



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Marieke Anderßen

# **Planung, Entwicklung und Testung der erforderlichen Schnittstellenprogramme für einen Hybridversuchsstand in LabVIEW**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Marieke Anderßon**

**Planung, Entwicklung und Testung der  
erforderlichen Schnittstellenprogramme  
für einen Hybridversuchsstand in  
LabVIEW**

Bachelor eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau - Energie- u. Anlagensysteme (Bachelor of Science)  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Alexander von Stryk

Abgabedatum: 29.06.2023

# **Zusammenfassung**

**Marieke Anderßon**

## **Thema der Bachelorthesis**

Planung, Entwicklung und Testung der erforderlichen Schnittstellenprogramme für einen Hybridversuchsstand in LabVIEW

## **Stichworte**

LabVIEW, Schnittstellenprogramm, SCPI-Programmierung, Statusregister

## **Kurzzusammenfassung**

Am *Institut für Erneuerbare Energien* an der HAW wird ein Hybridversuchsstand aufgebaut. Zunächst werden für die Spannungsquelle und den Verbraucher Geräte der Hersteller Keysight und Itech verwendet. Ziel dieser Arbeit ist es, geeignete Schnittstellenprogramme zur Ansprache, Steuerung und Auswertung dieser Geräte zu entwickeln. Die Programme sollen in ein Regelungsprogramm für den gesamten Versuchsstand eingebunden werden können. Die Programme sollen in LabVIEW umgesetzt werden. Zu Beginn der Arbeit werden die beiden Geräte und ihre Funktionen vorgestellt, sowie notwendige Grundlagen zur Programmierung mit LabVIEW. Im Weiteren werden die entwickelten Programme und notwendigen Unterprogramme beschrieben. Anschließend werden einige Versuche durchgeführt, die die Funktionen der Programme prüfen und das Verhalten bei verschiedenen Einstellungen untersuchen. In der Auswertung der Messversuche werden Nutzungshinweise für beide Geräte und den Betrieb in einem Versuchsstand formuliert, die einen sicheren und sinnvollen Betrieb gewährleisten sollen.

**Marieke Anderßon**

## **Title of the paper**

Planning, development and testing of the required interface programs for the hybrid test stand in LabVIEW

## **Keywords**

LabVIEW, interface program, SCPI programming, status register

## **Abstract**

At the *Institute for Renewable Energies* at the HAW, a hybrid test stand is set up. For now, the voltage source and the Load are realized with devices from Keysight and Itech. The aim of this paper is to develop appropriate interface programs to address, control and evaluate those devices. The programs are meant to be part of a regulation program for the whole test stand. The programming environment LabVIEW should be used to develop the interface programs. At the beginning of the paper, both devices and their functions are described as well as some basics for programming with LabVIEW. Second, the interface programs and all their subprograms are described. Furthermore, tests are accomplished to prove all functions of the programs and investigate the behaviour of the devices with different settings. In the Evaluation of the tests, instructions for the use of both devices in the test stand are given. Those are to ensure a secure and sensible operation.



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

*Hamburg University of Applied Sciences*

*Department Maschinenbau und Produktion*

# **Aufgabenstellung**

**für die Bachelorthesis**

**von Frau Marieke Anderßon**

Matrikel-Nummer: 

**Thema:**

Planung, Entwicklung und Testung der erforderlichen Schnittstellenprogramme für einen Hybridversuchsstand in LabVIEW

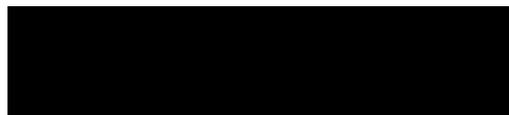
**Schwerpunkte:**

Am Institut Erneuerbare Energien befindet sich ein Versuchsstand in der Entwicklung, bestehend aus einer Spannungsquelle (Power Supply), einer Elektronischen Last (Electronic Load) und einer Blei-Gel-Batterie. Spannungsquelle und Elektronische Last sollen extern angesteuert werden und Werte für z.B. Strom und Spannung müssen ausgelesen werden. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung geeigneter Schnittstellenprogramme für diesen Versuchsstand.

Darunter fallen Analyse und Bewertung möglicher Programmierungsansätze in Labview, sowie die Definition aller Anforderungen an das Schnittstellenprogramm. Es werden ein oder mehrere Programmteile entwickelt, die universell eingesetzt werden können und alle Anforderungen erfüllen. Geeignete Versuche werden entwickelt und durchgeführt, um alle Funktionen zu prüfen. Dazu gehört, Werte für Spannung und Last einzustellen, aktuelle Werte auszulesen und eine Möglichkeit zur manuellen Unterbrechung im Fehlerfall. Gerätegrenzen werden bestimmt, indem die maximale Abtastrate ermittelt und der Verlauf einer Sprungantwort untersucht wird. Eine durch simultane Ansteuerung von Spannungsquelle und Elektronischer Last auftretende Fehlfunktion muss ausgeschlossen werden. In der Dokumentation werden alle Ergebnisse und eine Erläuterung zur weiteren Verwendung der Programme festgehalten.



Datum



Erstprüfer/in

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abkürzungen .....	III
Formelverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	V
1 Einleitung .....	1
2 Technischer Hintergrund.....	2
2.1 Power Supply .....	2
2.2 Elektronische Last.....	4
2.3 SCPI-Programmierung.....	7
2.4 LabVIEW.....	11
3 Aufgabenstellung und Lastenheft.....	19
4 Programme .....	21
4.1 Steuerprogramm für das Power Supply.....	21
4.2 Steuerprogramm für die Elektronische Last.....	24
4.3 SubVIs .....	26
4.3.1 set_cmds.vi .....	26
4.3.2 set_and_get.vi.....	27
4.3.3 EL_build_cmd.vi .....	28
4.3.4 get_Bit_Nr.vi .....	30
4.3.5 decimal_sum.vi.....	31
4.4 Beispiel: Control-VI.....	32
5 Messungen/ Untersuchungen.....	36
5.1 Oszilloskop.....	36
5.2 Experiment 1: Kombi-Betrieb .....	40
5.2.1 Constant Current-Messreihen.....	42
5.2.2 Constant Voltage-Messreihen.....	43
5.2.3 Constant Power-Messungen .....	44
5.2.4 Constant Resistance-Messungen .....	46
5.3 Experiment 2: Langzeitversuche .....	47
5.4 Experiment 3: Funktionsdauertests.....	49
5.5 Experiment 4: Wartezeitmessungen .....	51

5.6	Betriebshinweise.....	54
6	Zusammenfassung/ Fazit.....	55
	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	56
A	Anhang .....	A-1
B	Anhang .....	B-1
C	Anhang .....	C-1

## Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
<i>CC</i>	<i>Constant Current</i>
<i>CR</i>	<i>Constant Resistance</i>
<i>CV</i>	<i>Constant Voltage</i>
<i>CW</i>	<i>Constant Power</i>
<i>EL</i>	Elektronische Last
<i>PS</i>	<i>Power Supply</i>
<i>FGV</i>	Funktionale Globale Variable
<i>VI</i>	<i>Virtual Instrument</i>
<i>OCP</i>	<i>Over Current Protection</i>
<i>OPP</i>	<i>Over Power Protection</i>
<i>OTP</i>	<i>Over Temperature Protection</i>
<i>OVP</i>	<i>Over Voltage Protection</i>

## Formelverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
<i>I</i>	<i>A</i>	Strom
<i>U</i>	<i>V</i>	Spannung
<i>P</i>	<i>W</i>	Leistung
<i>R</i>	<i>Ohm</i>	Widerstand

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Standardeinstellungen am Power Supply.....	3
Tabelle 2: Standardeinstellungen an der Elektronischen Last.....	7
Tabelle 3: Ausgewählte VISA-Funktionen mit Beschreibungen (vgl. [7]).....	18
Tabelle 4: Ein- und Ausgänge des Programms <code>PS_FGV.vi</code> .....	21
Tabelle 5: Fälle der ersten Case-Struktur in dem Programm <code>PS_FGV.vi</code> .....	22
Tabelle 6: Fälle der ersten Case-Struktur in dem Programm <code>EL_FGV.vi</code> .....	25
Tabelle 7: Verwendung und Funktionsübersicht der SubVIs.....	26
Tabelle 8: Ein- und Ausgänge des SubVIs <code>set_cmds.vi</code> .....	26
Tabelle 9: Ein- und Ausgänge des SubVIs <code>set_and_get.vi</code> .....	27
Tabelle 10: Ein- und Ausgänge des SubVIs <code>EL_build_cmd.vi</code> .....	28
Tabelle 11: Ein- und Ausgang des VIs <code>get_Bit_Nr.vi</code> .....	31
Tabelle 12: Ein- und Ausgang des VIs <code>decimal_sum.vi</code> .....	32
Tabelle 13: Beschreibung der Front Panel Elemente von <code>Control_exmpl.vi</code> .....	33
Tabelle 14: Elemente der Datencluster im Programm <code>Control_exmpl.vi</code> .....	35
Tabelle 15: Variablen eines Experiments (Kombi-Betrieb).....	40
Tabelle 16: Variable und konstante Werte der Messreihen (Kombi-Betrieb).....	42
Tabelle 17: Ausschnitt der Messwerte des Langzeitversuchs.....	47
Tabelle 18: Messwerte aus den Funktionsdauertests des Power Supplys.....	50
Tabelle 19: Messwerte aus den Funktionsdauertests der Elektronischen Last.....	50
Tabelle 20: Wertetriplets für die Wartezeitmessungen.....	51
Tabelle A - 1: Standardeinstellungen, MIN und MAX am Power Supply.....	A-1
Tabelle A - 2: Standardeinstellungen, MIN und MAX an der Elektronischen Last.....	A-2
Tabelle A - 3: Alle Funktionen des Steuerprogramms für die Elektronische Last ( <code>EL_FGV.vi</code> ) .....	A-6
Tabelle A - 4: Alle Funktionen des Steuerprogramms für das Power Supply ( <code>PS_FGV.vi</code> ) .....	A-8
Tabelle C - 1: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CC-Messreihe.....	C-2
Tabelle C - 2: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CV-Messreihe.....	C-3
Tabelle C - 3: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CW-Messreihe (Variante 1) .....	C-6
Tabelle C - 4: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CW-Messreihe (Variante 2). .....	C-8
Tabelle C - 5: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CR-Messreihe (Variante 1) .....	C-9
Tabelle C - 6: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CR-Messreihe (Variante 2) .....	C-10
Tabelle C - 7: Messwerte aus den Wartezeitmessungen Variante 1.....	C-12
Tabelle C - 8: Messwerte der Wartezeitmessungen Variante 2.....	C-14

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strom der Last bei eingeschalteter VON-Funktion ([1], S.29) .....	6
Abbildung 2: Statusregister für das Keysight E36321A (Power Supply) (nach [4], S.31).....	10
Abbildung 3: Statusregister für das Itech 8812C (Elektronische Last) (nach [2]“, S. 17) .....	10
Abbildung 4: Beispiel für eine While-Schleife.....	12
Abbildung 5: Beispiel für eine Case-Struktur .....	13
Abbildung 6: Beispiel für eine Eventstruktur.....	13
Abbildung 7: Aufbau einer funktionalen globalen Variable ([9]).....	14
Abbildung 8: Aufbau einer State Machine in LabVIEW .....	15
Abbildung 9: Ablaufdiagramm einer JKI State Machine .....	15
Abbildung 10: JKI State Machine Explorer .....	16
Abbildung 11: Block Diagram einer leeren JKI State Machine im Fall „Macro: Initialize“ .....	16
Abbildung 12: Fall "Data: Initialize" einer leeren JKI State Machine.....	17
Abbildung 13: Fall "UI: Front Panel State" mit Argument-Case-Struktur in einer JKI State Machine.....	17
Abbildung 14: Aufbau des Hybridversuchsstandes.....	19
Abbildung 15: Ein- und Ausgänge des Programms PS_FGV.vi .....	22
Abbildung 16: Ausschnitt aus dem ersten Fall in PS_FGV.vi .....	23
Abbildung 17: Funktion VISA-Close im Fall "close" (PS_FGV.vi).....	23
Abbildung 18: Mindestwartezeit zwischen zwei Aufrufen des Programms PS_FGV.vi .....	24
Abbildung 19: Ein- und Ausgänge des Programms EL_FGV.vi .....	24
Abbildung 20: a) Icon und b) Block Diagram des SubVIs set_cmds.vi .....	27
Abbildung 21: a) Icon und b) Block Diagram des SubVIs set_and_get.vi .....	28
Abbildung 22: Icon des SubVIs EL_build_cmd.vi.....	29
Abbildung 23: Ausschnitte aus dem Block Diagram des SubVIs EL_build_cmd.vi .....	29
Abbildung 24: Block Diagram des SubVIs get_Bit_Nr.vi.....	31
Abbildung 25: Block Diagram des VIs decimal_sum.vi.....	31
Abbildung 26: Front Panel des Programms Control_exmpl.vi .....	32
Abbildung 27: JKI State Machine Explorer des Programms Control_exmpl.vi.....	34
Abbildung 28: Initialisierung des Datenclusters der JKI State Machine in Control_exmpl.vi .....	35
Abbildung 29: Spannungsverlauf bei Ein- und Ausschalten der Geräte .....	36
Abbildung 30: Spannungsverlauf beim Einschalten des Power Supplys: a) Änderungsrate maximal und b) bei 50 V/s.....	37
Abbildung 31: Spannungsverlauf beim Einschalten der Elektronischen Last.....	38
Abbildung 32: Spannungsverlauf beim Ausschalten der Elektronischen Last .....	38
Abbildung 33: Spannungsverlauf beim Ausschalten des Power Supplys : a) Änderungsrate maximal und b) bei 50 V/s.....	39
Abbildung 34: Ablaufdiagramm des Programms kombi_exp.vi (Kombi-Betrieb).....	41
Abbildung 35: Ergebnisse aus den CW-Messreihen (Variante 1) .....	45
Abbildung 36: Ablaufdiagramm des Programms langzeit_exp.vi (Langzeitversuch).....	48
Abbildung 37: Block Diagram des Programms Funktionsdauerstest_PS.vi.....	49

Abbildung 38: Ablaufdiagramm des Programms <code>wartezeit_CC.vi</code> (Wartezeitmessung)..	52
Abbildung 39: Werte aus der Wartezeitmessung (Variante 1, Modus CC) .....	53
Abbildung 40: Werte aus der Wartezeitmessung (Variante 2, Modus CW) .....	53
Abbildung B - 1: Block Diagram des Steuerprogramms für die Elektronische Last ( <code>EL_FGV.vi</code> )	
.....	B-1
Abbildung B - 2: 2. Fall "Close" (oben) und 3. Fall "without parameter": "Reset ()" (unten)..	B-2
Abbildung B - 3: Zweite Case-Struktur: "set CC ()", "set CV ()" (oben), "set CW ()", "set CR ()" (unten) .....	B-3
Abbildung B - 4: Zweite Case-Struktur: "set Remote ()", "set Remote with Lock ()" (oben), "set Local ()", "Protection Clear ()" (unten) .....	B-4
Abbildung B - 5: "Clear Status ()"; "wait to continue ()" (oben); "preset EnR ()" (unten) .....	B-5
Abbildung B - 6: 4. Fall "set and read boolean" (oben); „set boolean“-Fall; Befehls-Array „set boolean cmds“ (unten) .....	B-6
Abbildung B - 7: 5. Fall "set and read double"; Befehls-Array „set double cmds“ (oben); „set double“-Fall; "read Measure Current (double)" (unten).....	B-7
Abbildung B - 8: "read Measure Voltage (double)" (oben); 6. Fall "set and read string" (unten) .....	B-8
Abbildung B - 9: "read Mode (string)"; "read IDN (string)" (oben); "read Self-test (string); "read error (string)" (unten) .....	B-9
Abbildung B - 10: "set free command (string)" .....	B-10
Abbildung B - 11: Block Diagram des Steuerprogramms für das Power Supply ( <code>PS_FGV.vi</code> )	
.....	B-11
Abbildung B - 12: 2. Fall "Close" (oben); 3. Fall "without parameter": „Reset“ (unten) .....	B-12
Abbildung B - 13: "set pref CC ()"; ""set pref CV ()" (oben); "set Current Step Up ()"; "set Current Step Down ()" (unten) .....	B-13
Abbildung B - 14: "set Voltage Step Up ()"; "set Voltage Step Down ()" (oben); "set Remote ()"; "set Remote with Lock ()" (unten) .....	B-14
Abbildung B - 15: "set Local ()"; "Output Protection Clear ()" (oben); "OCP Clear ()"; "OVP Clear ()" (unten).....	B-15
Abbildung B - 16: "Clear Status ()"; "Sense 2wire ()" (oben); "Sense 4wire ()"; "wait to continue ()" (unten).....	B-16
Abbildung B - 17: "Preset Ques EnR ()" (oben); 4. Fall: "set and read boolean" (unten) .....	B-17
Abbildung B - 18: „set boolean“-Funktionen; Befehls-Array „set boolean cmds“ (oben); 5. Fall: "set and read double" (unten) .....	B-18
Abbildung B - 19: „set double“-Funktionen; Befehls-Array „set double cmds“ (oben); "read Measure Current (Double)"; "read Measure Voltage (Double)" (unten) .....	B-19
Abbildung B - 20: 6. Fall "set and read string" (oben); "read Preferred Mode (string)"; "read Remote_or_Local (string)" (unten) .....	B-20
Abbildung B - 21: "read IDN (string)"; read Self-test (string)" (oben); "read error (string)"; "read Sense Mode (string)" (unten).....	B-21
Abbildung B - 22: "set free command (string)" .....	B-22
Abbildung B - 23: Block Diagram des SubVIs <code>PS_build_cmd.vi</code> .....	B-23
Abbildung B - 24: Block Diagram des SubVIs <code>EL_build_cmd.vi</code> .....	B-24

# 1 Einleitung

Praktische Versuche sind im Ingenieurwesen unerlässlich. Sie stellen grundsätzliche Zusammenhänge anschaulich dar und unterstützen so die Ausbildung im Studium. Des Weiteren müssen theoretische Annahmen und Berechnungen bestätigt werden und für die Überprüfung der korrekten Funktion von Prototypen oder neuen Produkten führt ebenfalls kein Weg an Messversuchen vorbei. Für die Regelung dieser Versuche sowie die Auswertung der Messwerte werden dabei heutzutage immer häufiger Regelungsprogramme genutzt. Sie unterstützen den Anwender bei der Versuchsdurchführung, Ablesefehler werden vermieden und die Ergebnisse werden vergleichbarer. Dazu braucht es allerdings geeignete Schnittstellenprogramme, um die eingesetzten Geräte anzusprechen sowie Werte auszulesen. LabVIEW ist seit Jahren eine der gängigsten Programmierumgebungen für solche Anwendungen.

An der HAW Hamburg wird ein besonderes Augenmerk auf begleitende Laborveranstaltungen gelegt, um den Studierenden die theoretisch behandelten Themen in praktischen Versuchen näher zu bringen. Damit die Ausbildung stets auf dem neuesten Stand bleibt, werden Versuchsstände mit der Zeit verändert, angepasst oder ganz neu entwickelt und außerdem werden sie digitaler.

Diese Arbeit entsteht im Rahmen eines Hybridversuchsstandes, der am *Institut Erneuerbare Energien* aufgebaut wird. Er wird unter anderem aus einer Spannungsquelle, einem Energiespeicher und einem Verbraucher bestehen. Für die Spannungsquelle und den Verbraucher sollen in einem ersten Aufbau Geräte verwendet werden, die ein entsprechendes Verhalten simulieren. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung geeigneter Schnittstellenprogramme zu den verwendeten Geräten, gleichzeitig soll die Arbeit aber auch als Leitfaden dienen und den Einsatz dieser Geräte in anderen Anwendungen erleichtern. Es gibt weitere Arbeiten zu dem Hybridversuchsstand, die sich mit dem Regelungskonzept und der Entwicklung eines passenden Regelungsprogrammes beschäftigen.

## 2 Technischer Hintergrund

### 2.1 Power Supply

Die Spannungsquelle (*Power Supply*) ist ein Gerät von Keysight mit der Modellnummer E36231A, es kann eine maximale Leistung von 200 W liefern. Für Spannung und Strom muss ein Grenzwert, also ein maximaler Wert, eingestellt werden, der je nach Betriebsmodus auch als konstanter Wert verwendet wird. Für die Spannung kann maximal 30,9 V und für den Strom maximal 20,9 A eingestellt werden. Mit der Step-Funktion können die Grenzwerte für Strom und Spannung um einen einstellbaren Wert erhöht oder gesenkt werden (vgl. [5], S. 29).

Das *Power Supply* kann in den Betriebsmodi *Constant Voltage* oder *Constant Current* arbeiten, wobei der Modus nicht einstellbar ist, sondern sich aus den Bedingungen der angeschlossenen Last ergibt. Das *Power Supply* befindet sich im Modus *Constant Voltage (CV)*, wenn der Lastwiderstand am *Output* größer ist als der Grenzwert der Spannung geteilt durch den Grenzwert des Stroms (**Gleichung 1**).

$$R_L > \frac{U_G}{I_G} \quad (1)$$

Im Modus CV entspricht die Spannung am *Output* dann konstant dem eingestellten Grenzwert; der Strom stellt sich je nach Anforderung der Last ein, begrenzt durch den eingestellten Grenzwert.

Das *Power Supply* befindet sich im Modus *Constant Current (CC)*, wenn der Lastwiderstand am *Output* kleiner ist als der Grenzwert der Spannung geteilt durch den Grenzwert des Stroms (**Gleichung 2**).

$$R_L < \frac{U_G}{I_G} \quad (2)$$

Der Strom am *Output* entspricht dem eingestellten Grenzwert und die Spannung ergibt sich wieder je nach Anforderung der angeschlossenen Last im Rahmen der vorgegebenen Grenze (vgl. [5], S.67). Erst wenn der *Output* eingeschaltet wird, liefert das *Power Supply* tatsächlich eine Leistung. Es kann ein bevorzugter Modus eingestellt werden; das beeinflusst aber nicht, in welchem Modus das *Power Supply* tatsächlich arbeitet, sondern für welchen Modus der Einschaltvorgang optimiert ist. Es kann eine Verzögerungszeit eingestellt werden, sowohl für das Ein- als auch das Ausschalten des *Outputs*; für Ein- und Ausschalten können die Verzögerungszeiten unterschiedlich sein. Die tatsächlichen Werte für Strom, Spannung und Leistung am *Output* werden ständig auf dem Display des Geräts angezeigt.

#### Schutzfunktionen

Das *Power Supply* verfügt über Schutzfunktionen zum Schutz vor zu hohem Strom, zu hoher Spannung und zu hoher Temperatur. Wird eine dieser Schutzfunktionen durch Überschreiten der Grenze ausgelöst, wird der *Output* abgeschaltet und gesperrt, eine eventuelle Verzögerungszeit für das Abschalten wird in diesem Fall nicht berücksichtigt. Dann müssen die Einstellungen angepasst werden und die Sperre am *Output* gelöscht werden. Die Funktion *Over*

*Temperature Protection (OVT)* überwacht die Temperatur im Gerät und ist immer aktiv, die Grenze ist vom Hersteller vorgegeben. Grundsätzlich aktiviert ist auch die Funktion *Over Voltage Protection (OVP)*, die vor einer Überspannung schützt, sie kann aber deaktiviert werden. Die Grenze ist durch den Nutzer einstellbar und beträgt höchstens 110% der maximal möglichen Spannung. Die Funktion *Over Current Protection (OCP)* muss aktiviert werden und überwacht dann den Strom am *Output*. Überschreitet der Strom die eingestellte Grenze, wechselt der Betriebsmodus von *CV* zu *CC* und bewirkt damit ein Abschalten des *Outputs*. Hierfür kann eine Verzögerung eingestellt werden, um ein sofortiges Auslösen der *OCP* bei kurzen Wechseln zum Modus *CC* zu vermeiden. Die Verzögerungszeit kann entweder bei jedem Wechsel in den Modus *CC* starten oder nur am Ende einer Veränderung von Spannung, Strom oder des *Outputs* (vgl. [5], S. 69ff.).

### Fehlerliste

Tritt ein Fehler im Gerät auf, wird er in den Fehlerspeicher (*Error List*) geschrieben. Dieser funktioniert nach dem FIFO-Prinzip (*First In First Out*), es wird also der zuletzt aufgetretene Fehler als erstes wieder ausgegeben. Die Einträge werden gespeichert, bis sie durch Lesen gelöscht werden, die Fehlerliste kann bis zu 20 Einträge speichern. Ist die Liste voll und es tritt ein weiterer Fehler auf, wird der letzte Eintrag durch den Eintrag „Queue overflow“ ersetzt und keine weiteren Fehler werden aufgenommen. Sobald sich mindestens ein Fehler im Fehlerspeicher befindet, wird dies auf dem Display des Geräts angezeigt (vgl. [4], S.17).

### Standardeinstellungen

Mit der Funktion „Reset“ werden die Einstellungen zurückgesetzt. In **Tabelle 1** sind die Standardwerte (*default*) angegeben.

Für minimal und maximal einstellbare Werte siehe **Tabelle A - 1** in **Anhang A**.

Bezeichnung	DEF = RESET	Einheit
Output State	OFF	
OCP State	OFF	
OVP State	ON	
Voltage Slew Rise/ Fall Max	ON	
Sense Mode	INT	
Preferred Mode	VOLT	
Current	2	A
Current Step	0,0012311	A
Voltage	0	V
Voltage Step	0,00195327	V
Output Delay Fall	0	s
Output Delay Rise	0	s
Over-Current Protection Limit	22	A
Over-Current Protection Delay	0,05	s
Over-Voltage Protection Limit	33	V
Voltage Slewrate Rise	$9,9 \cdot 10^{37}$	V/s
Voltage Slewrate Fall	$9,9 \cdot 10^{37}$	V/s

Tabelle 1: Standardeinstellungen am Power Supply

## 2.2 Elektronische Last

Das Gerät von *Itech Electronic* ist eine programmierbare Elektronische Last der Serie IT8812C. Es hat eine maximale Leistung von 250 W wobei der Strom höchstens 60 A und die Spannung höchstens 120 V betragen kann (vgl. [1], S. 39). Die Elektronische Last hat vier verschiedene Betriebsmodi, die auch als *Constant Status* Funktionen bezeichnet werden. Die vier Modi sind *Constant Current (CC)*, *Constant Voltage (CV)*, *Constant Power (CW)* und *Constant Resistance (CR)*. Für jeden Modus muss ein konstanter Sollwert eingestellt werden. Für die Modi *CV*, *CW* und *CR* bleiben die Sollwerte auch bei einem Wechsel des Modus erhalten, der Sollwert für den Strom (Modus *CC*) wird zu null bei einem Wechsel. Mit Einschalten des *Inputs* wird die Elektronische Last aktiviert und regelt über den Strom am *Input* den jeweiligen Sollwert ein. Für das Einschalten kann eine Verzögerungszeit eingestellt werden; die Verzögerung muss aktiviert sein, damit sie verwendet wird. Die tatsächlichen Werte für Strom, Spannung und Leistung am *Input* können ständig auf dem Display des Geräts abgelesen werden (vgl. [1], S. 12ff.).

### Constant Status Funktionen

Im Modus *CC* hält die Elektronische Last den Strom am *Input* konstant auf dem Sollwert. Für die Spannung kann ein minimaler und ein maximaler Wert eingestellt werden. Übersteigt die am *Input* herrschende Spannung den Maximalwert nicht, wird sie von der angeschlossenen Spannungsquelle bestimmt.

Im Modus *CV* regelt die Elektronische Last die Spannung am *Input* so, dass sie konstant bleibt und dem Sollwert entspricht. Für diesen Modus kann eine untere und obere Grenze für den Strom eingestellt werden. Solange die Grenzen nicht über- oder unterschritten werden, wird die Höhe des Stroms von der angeschlossenen Spannungsquelle bestimmt.

Im Modus *CW* wird die Leistung am *Input* konstant auf dem Sollwert gehalten. Die Spannung wird von der angeschlossenen Spannungsquelle vorgegeben, der Strom entsprechend geregelt. Auch in diesem Modus kann eine obere und untere Grenze für die Spannung eingestellt werden.

Im Modus *CR* wirkt die Elektronische Last wie ein ohmscher Widerstand in der Höhe des eingestellten Sollwertes. Die Spannung wird von der angeschlossenen Spannungsquelle bestimmt, solange sie sich innerhalb der einstellbaren Grenzen befindet; der Strom ergibt sich je nach Höhe des Widerstands wie in **Gleichung 3** (vgl. [1], S. 12ff.).

$$I_{EL} = \frac{U_{PS}}{R_{EL}} \quad (3)$$

### Schutzfunktionen

Die Elektronische Last verfügt über Schutzfunktionen, die vor Überstrom, Überspannung, Überleistung oder Übertemperatur schützen. Bei Überschreiten des Grenzwertes einer dieser Funktionen wird der *Input* ausgeschaltet und gesperrt, sowie die ausgelöste Funktion auf dem Display angezeigt. Der *Input* kann erst wieder eingeschaltet werden, wenn die auslösende Einstellung geändert und die Sperre am *Input* durch die Schutzfunktion mit einem bestimmten Befehl gelöscht wurde. Die Schutzfunktion für eine zu hohe Temperatur ist immer aktiv und die Grenzwerte sind nicht einstellbar; ab einer inneren Temperatur von 85°C wird eine solche *Over*

*Temperatur Protection (OTP)* ausgelöst. Gleichzeitig werden die Bits Nummer vier (*Over Temperature*) und dreizehn (*Protection Shutdown*) im *Questionable Status Register* (→ **Kap. 2.3**) gesetzt. Auch die *Over Voltage Protection (OVP)* ist immer aktiv und die Spannungsgrenze nicht einstellbar. Bei überschrittenem Grenzwert werden die Bits Nummer null (*Voltage Fault*) und zwölf (*Over Voltage*) im *Questionable Status Register* gesetzt. Die *Over Current Protection (OCP)* zum Schutz vor Überstrom kann deaktiviert werden. Immer aktiv bleibt dabei die *Hardware OCP*. Die Grenze dafür beträgt 110% des maximalen Stroms und bei Überschreiten wird das Bit Nummer eins (*Over Current*) im *Questionable Status Register* gesetzt. Der Status des *Inputs* wird hierbei nicht verändert. Ist die *Software OCP* aktiviert, kann eine Grenze für den maximalen Strom festgelegt werden, die aber die 110% des maximalen Stroms nicht überschreiten darf. Zusätzlich kann eine Verzögerung festgelegt werden. Bei Überschreiten der Grenze wird die *OCP* erst nach Ablauf dieser Verzögerungszeit ausgelöst. Das ist sinnvoll, um ein Auslösen bei kurzen Schwankungen über der Grenze zu vermeiden. Wird bei aktivierter *OCP* die festgelegte Grenze länger als die Verzögerungszeit überschritten, wird die *OCP* dennoch ausgelöst und der *Input* wird abgeschaltet, sowie die Bits Nummer eins und dreizehn gesetzt. Auch die *Over Power Protection (OPP)* hat die zwei Arten *Hardware* und *Software OPP*. Beide sind immer aktiv und die Grenze kann vom Nutzer eingestellt werden, ist jedoch durch die maximal mögliche Leistung begrenzt. Wird die Grenze der *Hardware OPP* überschritten, wird lediglich das Bit Nummer drei gesetzt, der Status des *Inputs* aber nicht verändert. Wird die Grenze der *Software OPP* überschritten, wird der *Input* abgeschaltet und zusätzlich das Bit Nummer dreizehn gesetzt. Für die *Software OPP* kann eine Verzögerungszeit eingestellt werden, um ein Auslösen bei kurzen Schwankungen über die Grenze zu vermeiden (vgl. [1], S. 29f.).

### **Kurzschlussfunktion**

Die Elektronische Last verfügt über eine Kurzschlussfunktion, die ein- und ausgeschaltet werden kann. Bei eingeschalteter Funktion wird je nach Betriebsmodus auf unterschiedliche Art ein Kurzschluss generiert. Der maximale Kurzschlussstrom in den Modi CC, CW und CR beträgt 110% des maximalen Stroms. Im Modus CV wird die konstante Spannung null gesetzt. Die Kurzschlussfunktion verändert nicht die Einstellungen zum Betriebsmodus und den Sollwerten. Wird sie wieder abgeschaltet, kehrt die Last wieder zu den zuvor getroffenen Einstellungen zurück (vgl. [1], S. 17).

### **VON-Funktion**

Für diese Funktion kann ein Spannungswert eingestellt werden. Die Last wird erst eingeschaltet, wenn die Spannung der angeschlossenen Quelle diesen Wert überschritten hat (→ **Abbildung 1**). Damit wird verhindert, dass eine Schutzfunktion ausgelöst wird, wenn die Quelle nach der Last eingeschaltet wird oder eine langsame Anstiegsrate der Spannung hat. Sinkt die Spannung unter die VON-Spannung, wird die Last nicht automatisch abgeschaltet. In den Standardeinstellungen ist die VON-Funktion aktiviert mit einem Spannungswert von 0,1 V, sie kann aber auch deaktiviert werden. Im Modus CV hat die Funktion keinen Einfluss (vgl. [1], S. 28).

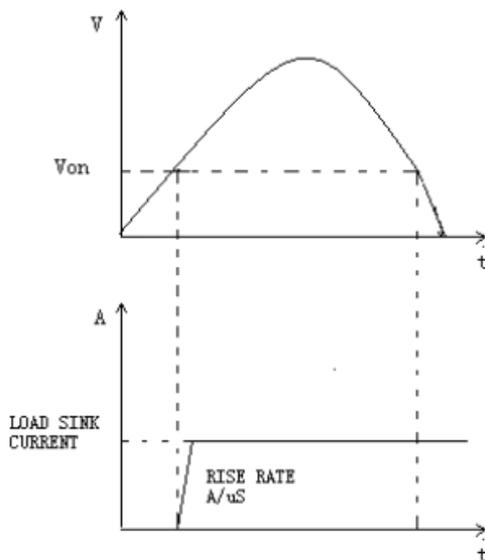


Abbildung 1: Strom der Last bei eingeschalteter VON-Funktion ([1], S.29)

### Remote

Die Last kann lokal über die Tasten am Gerät oder mit SCPI-Befehlen extern gesteuert werden (→ **Kap. 2.3**). Die Schnittstelle zum Computer für eine externe Steuerung ist über RS-232, USB oder GPIB möglich. Dafür kann die Last in den „Remote“-Modus gestellt werden, die Tasten am Gerät sind dann bis auf die „Local“-Taste alle gesperrt. Mit der Funktion „Remote with Lock“ werden alle Tasten gesperrt. Befindet sich das Gerät im Lokalmodus, kann es sowohl über die Tasten am Gerät als auch extern gesteuert werden (vgl. [2], S. 9).

### Fehlerliste

Tritt ein Fehler im Gerät auf, wird er in den Fehlerspeicher geschrieben. Die Einträge werden gespeichert, bis sie durch Lesen gelöscht werden; die Fehlerliste kann bis zu 32 Einträge speichern. Ist die Liste voll, werden keine neuen Fehler aufgenommen, bis welche gelöscht werden. Enthält die Liste mindestens einen Eintrag, wird das Bit Nummer zwei im *Status Byte Register* (*EAV = Error Available*) gesetzt (→ **Kap. 2.3**). Außerdem wird auf dem Display des Geräts angezeigt, dass ein Fehler aufgetreten ist (vgl. [2], S. 12).

### Standardeinstellungen

Mit der Funktion „Reset“ werden die Einstellungen zurückgesetzt (vgl. [2], S.22). In **Tabelle 2** sind die Standardwerte (*default*) angegeben. Minimal und maximal einstellbare Werte sind in **Tabelle A - 2** in **Anhang A** aufgeführt.

Bezeichnung	DEF = RESET	Einheit
Input State	OFF	
Input Delay State	OFF	
Short-circuit function	OFF	
Software OCP State	OFF	
Voltage Latch (VON-Funktion)	ON	
Function (Betriebsmodus)	CURR	
set Current	0	A
set Voltage	120	V
set Power	0	W
set Resistance	7500	Ohm
Input Delay	10	s
Over-Current Protection Limit	60	A
Over-Current Protection Delay	3	s
Software Over-Power Protection Limit	260	W
Over-Power Protection Delay	3	s
Hardware Over-Power Level	250	W
Current Slewrate Both	0	A/ms
Current Slewrate positive	5	A/ms
Current Slewrate negative	5	A/ms
high Voltage CC-Mode	130	V
low Voltage CC-Mode	0	V
high Current CV-Mode	66	A
low Current CV-Mode	0	A
high Voltage CW-Mode	130	V
low Voltage CW-Mode	0	V
high Voltage CR-Mode	130	V
low Voltage CR-Mode	0	V
Voltage ON (VON-Spannung)	0,1	V

Tabelle 2: Standardeinstellungen an der Elektronischen Last

## 2.3 SCPI-Programmierung

Alle programmierbaren Geräte wie das *Power Supply* und die Elektronische Last können mit sogenannten *Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI)* über eine Remote-Verbindung gesteuert werden. Mit den Befehlen können alle Einstellungen an den Geräten vorgenommen werden, sowie Zustände und Werte abgefragt werden. Es gibt *Common Commands* (allgemeine Befehle), die für alle programmierbaren Geräte dieser Art funktionieren. *Common Commands* bestehen aus drei Buchstaben und ihnen ist ein Sternchen vorangestellt; eine Abfrage schließt zusätzlich mit einem Fragezeichen ab. So wird zum Beispiel mit dem Befehl \*RST das Gerät resettet und alle Einstellungen werden auf die Voreinstellungen zurückgesetzt. Mit \*IDN? wird die Geräteidentifikation abgefragt.

Zusätzlich zu den *Common Commands* gibt es für jedes Gerät eine Reihe gerätespezifischer Befehle. Sie sind in einer Baumstruktur aufgebaut mit mehreren Ebenen, die mit einem

Doppelpunkt getrennt werden (z.B. CURR:PROT:LEV 9). Die übergeordnete Ebene des Befehls wird als *Header* bezeichnet, in dem Beispiel wäre CURR:PROT der *Header*. Es kann eine Reihe von Befehlen gemeinsam gesendet werden. Dabei werden Befehle der gleichen Ebene mit einem Semikolon getrennt. Befehle haben die gleiche Ebene, wenn sie den gleichen *Header* haben. Dieser darf dann nicht erneut eingegeben werden (z.B. CURR:PROT:LEV 9; STAT ON). Werden zwei Befehle mit unterschiedlichen *Headern* kombiniert, müssen diese mit Doppelpunkt und Semikolon getrennt werden (Bsp. CURR:PROT:LEV 9;; VOLT:LEV 10). Einige Befehle erfordern Parameter, dabei wird zwischen Befehl und Parameter ein Leerzeichen gelassen. Bei den Parametern kann es sich um Zahlenwerte, boolesche Werte (ON oder OFF) oder bestimmte Wörter handeln. Ist der Befehl eine Abfrage, wird ein Fragezeichen angefügt (Bsp. CURR:PROT:LEV?). Soll ein Parameter abgefragt werden, wird dieser mit einem Leerzeichen hinter dem Fragezeichen eingefügt (Bsp. CURR:PROT:LEV? MAX). Jeder Befehl bzw. jede Befehlskombination muss mit einem *Line Feed* oder einem Fragezeichen beendet werden.

### Status Register

Zur internen programmiertechnischen Organisation haben die *SCPI*-Geräte Statusregister. Diese sind in Gruppen unterteilt und verwalten Zustände und Funktionen. Eine Registergruppe besteht aus mehreren Registern mit jeweils acht oder sechzehn Bits, jedes Bit ist mit einem bestimmten Zustand oder einer Funktion belegt sind.

Es gibt vier Arten von Registern. Das Zustandsregister (*Condition*) ist ein Echtzeit-Register, die Bits sind nur gesetzt, während die Bedingung dafür erfüllt ist. Als zweites gibt es *PTransition* und *NTransition Register*. Sie senden ein positives oder negatives Signal an das Ereignisregister, wenn im *Condition Register* ein Bit gesetzt wird. Das Ereignisregister (*Event*) als drittes ist ein Nur-Lese-Register, die Bits können nicht vom Anwender gesetzt werden. Erhält das Register ein Signal von einem der vorherigen Register, wird das jeweilige Bit gesetzt und bleibt gesetzt, bis es ausgelesen wird. Der letzte Registertyp ist das *Enable Register*. Die Bits werden hier nur gesetzt, wenn ein Ereignis eintritt und das zugehörige Bit zuvor aktiviert wurde, als Standard sind alle Bits deaktiviert. Um die Register auszulesen oder Bits im *Enable Register* zu setzen, gibt es eine Reihe von *Common Commands*. Um ein einzelnes Bit anzusprechen, spricht zu setzen, wird ein spezieller Parameter verwendet. Dieser kann nach **Gleichung 4** mit Hilfe der Bitnummer berechnet werden, die Bitnummern beginnen bei null; der Parameter wird hier als Dezimalzahl bezeichnet. Sollen mehrere Bits gleichzeitig gesetzt werden, werden die Dezimalzahlen dieser Bits addiert und diese sogenannte Dezimalsumme als Parameter verwendet. Beim Auslesen eines Registers wird ebenfalls die Summe der Dezimalzahlen aller gesetzten Bits ausgegeben. Mit Hilfe des *SubVIs* `get_bit_nr.vi` (→ **Kap. 4.3.4**) können die Nummern der gesetzten Bits aus der ausgegebenen Dezimalsumme ermittelt werden.

$$\text{Dezimalzahl} = 2^{\text{Bitnummer}} \quad (4)$$

Das vierte Bit eines Registers hat beispielsweise die Bit-Nummer 3 und die Dezimalzahl  $2^3 = 8$  (vgl. [3]).

Die Register sind in Gruppen unterteilt, wobei nicht jedes Gerät alle Gruppen besitzen. Die erste Gruppe ist die *Questionable Status Register Group*. Dort werden Signale registriert, die auf einen regelwidrigen Betrieb hinweisen. Die zweite Gruppe ist die *Standard Event Register Group*, hier werden allgemeine Signale aufgezeichnet. Die *Operation Status Register Group*

zeichnet Signale auf, die durch einen speziellen Betrieb auftreten. Die *Status Byte Register Group* fasst die Signale der anderen Registergruppen zusammen und existiert in jedem programmierbaren Gerät. Die *Enable Register* der übrigen Gruppen sind mit einer logischen ODER-Verknüpfung mit je einem Bit im *Status Byte Register* verbunden. Dieses wird also gesetzt, sobald mindestens ein Bit im *Enable Register* in einer der anderen Gruppen gesetzt wird. Des Weiteren gibt es je ein Bit für den Ausgangsspeicher und den Fehlerspeicher. Diese werden gesetzt, sobald in dem jeweiligen Speicher ein Eintrag vorhanden ist. Die *Status Byte Register Group* besteht immer aus einem *Event Register* und einem *Enable Register*. Dieses *Enable Register* ist wiederum mit einem logischen ODER mit dem siebten Bit des *Status Byte Event Registers* verknüpft. Das siebte Bit hat die Bezeichnung *RQS* oder *MSS* und fasst das *Status Byte Register* und damit alle Register des Geräts zusammen [„Status-Tutorial“].

Das *Power Supply* hat zwei der optionalen Registergruppen (→ **Abbildung 2**). Die *Questionable Status Register Group* besteht aus einem *Condition Register*, einem *Event Register* und einem *Enable Register* mit jeweils 16 Bits. Die ersten drei Bits überwachen den Betriebsmodus des *Power Supply*. Bit 0 und 1 werden positiv, wenn Spannung (Bit 0) oder Strom (Bit 1) nicht geregelt sind. Folglich wird das Bit 0 im Modus *CC* und das Bit 1 im Modus *CV* gesetzt. Bit 3 zeigt den Modus *Constant Power* an. Sind alle Bits positiv, ist der Modus ungeregelt und sind alle Bits negativ, ist der *Output* des *Power Supply* abgeschaltet. Die *Standard Event Register Group* besteht aus einem *Event Register* und einem *Enable Register* mit jeweils acht Bits. Das Bit 0 wird gesetzt, wenn ein die Funktion „Operation Complete“ ausgeführt wurde; die übrigen Bits dokumentieren die verschiedenen Arten von Fehlern, die auftreten können (vgl. [4], S. 31ff.).

Die Elektronische Last hat alle drei optionalen Registergruppen (→ **Abbildung 3**). Die *Operation Status Register Group* enthält alle vier Registertypen mit jeweils acht Bits. Die *Questionable Status Register Group* besteht ebenfalls aus allen vier Registertypen, hat aber jeweils 16 Bits. Darin werden unter anderem die Schutzfunktionen registriert (→ **Kap. 2.2**). Die *Standard Event Register Group* besteht aus einem *Event Register* und einem *Enable Register* mit jeweils acht Bits und zeigt ebenfalls die verschiedenen Arten von Fehlern an, wenn sie auftreten (vgl. [2], S. 15ff.).

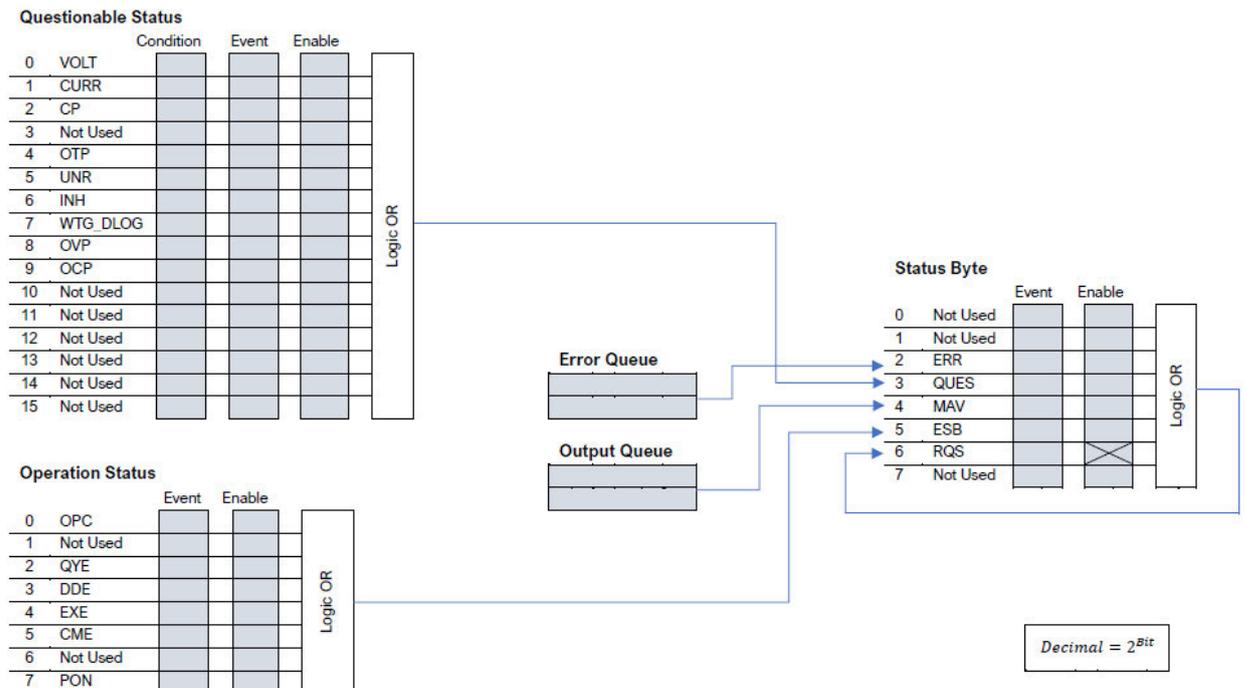


Abbildung 2: Statusregister für das Keysight E36321A (Power Supply) (nach [4], S.31)

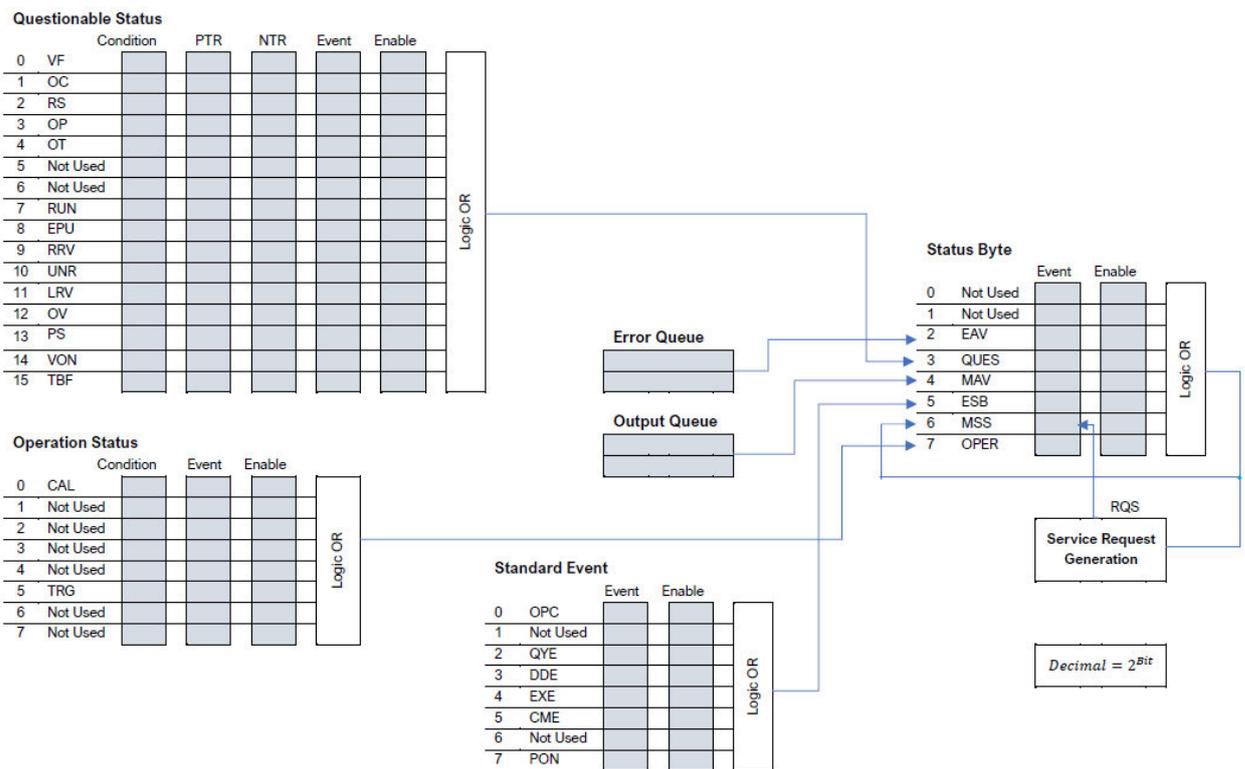


Abbildung 3: Statusregister für das Itech 8812C (Elektronische Last) (nach [2]“, S. 17)

## 2.4 LabVIEW

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering*) ist eine Entwicklungsumgebung, die entworfen wurde, um die Programmierung und Steuerung von Messgeräten sowie die Aufnahme, Verarbeitung und Visualisierung von Messdaten zu verbessern. Mittlerweile hat sie sich besonders im Ingenieurwesen und der Wissenschaft als Standard im Bereich Mess-, Steuer- und Regelungstechnik etabliert (vgl. [6], S. 1). LabVIEW basiert auf dem Datenflusskonzept und verwendet die grafische Programmiersprache G. Dabei sind die Programme einem Messgerät nachempfunden mit einer Bedienoberfläche (*Front Panel*) und einer inneren Struktur (*Block Diagram*) und werden daher als *Virtual Instruments* oder *VIs* bezeichnet. Wie bei einem Messgerät enthält das *Front Panel* die Bedienelemente für den Anwender, z.B. Schalter, Eingaben (*Controls*) oder Anzeigen (*Indicator*). Im *Block Diagram* wird die eigentliche Funktion des Programms mit Hilfe von kleinen Blöcken realisiert, die jeweils eine Teilaufgabe ausführen und mit Linien verbunden werden. Die Linien werden als Drähte bezeichnet und sind als Datenleitung zu verstehen (vgl. [6], S. 106). Die Farbe der Drähte gibt einen Hinweis auf den Typ der transportierten Daten, die Dicke einen Hinweis auf die Menge. So ist die Leitung eines einzelnen Wertes dünner als die eines *Arrays*. Jedes Bedienelement auf dem *Front Panel* hat ebenfalls einen Block im *Block Diagram*.

Wird ein Teil des Quellcodes aus dem *Block Diagram* häufiger benötigt, kann er für eine bessere Strukturierung in einem *SubVI* (Unterprogramm) zusammengefasst werden und dann als weiterer Block beliebig oft wieder eingefügt werden. Ähnlich wie in anderen Programmiersprachen gibt es auch bei LabVIEW klassische Strukturen wie Variablen oder Schleifen. Im Folgenden wird für ausgewählte Strukturen genauer beschrieben, wie die Umsetzung in LabVIEW funktioniert.

### **Enum, Cluster, Array**

In LabVIEW gibt es verschiedene Arten von Datenstrukturen. Die folgenden drei werden in den entwickelten Programmen häufig verwendet und daher kurz erläutert. Ein *Enum* ist ein Auswahllement, das beliebig viele Elemente haben kann. Ein Element beinhaltet den Index im Zahlenformat und eine Bezeichnung im Textformat. Konkret hat ein *Enum* immer nur einen Wert, zwischen den enthaltenen Werten kann aber per Dropdown-Menü gewechselt werden (vgl. [6], S. 362).

Ein *Array* kann eine oder mehrere Dimensionen haben mit beliebig vielen Elementen. Die Elemente können jeden beliebigen Datentyp haben, z.B. *Integer*, *String* oder *Boolean*, aber nur den gleichen innerhalb eines *Arrays*; ineinander verschachtelte *Arrays* sind nicht möglich (vgl. [6], S. 245).

Ein *Cluster* ist wie eine große Box zu verstehen, in der Elemente oder *Arrays* verschiedener Datentypen „gebündelt“ werden ([6], S. 295). Im Gegensatz zu einem *Array* können dem *Cluster* im laufenden Programm keine Elemente hinzugefügt werden. Grundsätzlich kann ein *Cluster* aber weitere *Cluster* enthalten und auch ein *Array* kann aus *Clustern* bestehen, wodurch sehr komplexe Datenstrukturen möglich sind. Werden alle Variablen eines Programms in einem *Cluster* zusammengefasst, kann dieses wie ein „Datenbus“ funktionieren, wodurch eine bessere Übersichtlichkeit gewährleistet wird (vgl. [6], S. 295f.).

## Typdefinition

In LabVIEW können alle Arten von Elementen als *Type Definition* gespeichert und so die Datenstruktur festgelegt werden. Wird die Struktur des entsprechenden Elements an einer Stelle geändert, ändern sich automatisch auch alle Kopien in allen Programmen und Unterprogrammen; das minimiert den Aufwand und vermeidet Fehler. Sinnvoll ist das besonders für Datenstrukturen des Typs *Enum* und *Cluster*, wenn mehrere Kopien davon innerhalb eines VIs verwendet werden und während der Programmierung noch mehrfach verändert werden. Zu beachten ist, dass nur die Datenstruktur in der *Type Definition* festgelegt ist, nicht die Daten selbst; diese können durchaus an jeder Stelle geändert werden. Bei einer *Strict Type Definition* wird zusätzlich auch das visuelle Erscheinungsbild auf dem *Front Panel* gespeichert (vgl. [6], S. 311f.).

## While-Schleife

Eine While-Schleife wiederholt so lange den enthaltenen Programmcode, bis die Abbruchbedingung erfüllt ist. In LabVIEW muss dafür ein boolesches Element mit dem Abbruchterminal der Schleife verbunden sein; außerdem kann aus dem Iterationsterminal der Schleife der aktuelle Iterationswert entnommen werden (vgl. [6], S. 156). In LabVIEW ist die While-Schleife nur im Blockdiagramm zu sehen, in **Abbildung 4** ist ein Beispiel dafür dargestellt. Darin werden laufend die Iterationswerte aufaddiert, bis ein boolesches Kontrollelement auf TRUE gesetzt wird; zusätzlich enthält die Schleife eine Verzögerungszeit von 50 ms.

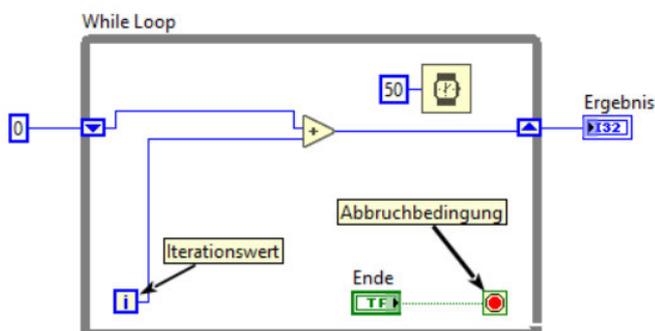


Abbildung 4: Beispiel für eine While-Schleife

## Case-Struktur

Eine Case-Struktur ist eine Fallstruktur, die zwischen zwei oder mehr Fällen unterscheiden und je nach Fall unterschiedliche Aktionen ausführen kann. Sie ist ebenfalls nur im Blockdiagramm zu sehen und besteht aus einem Rahmen, der beliebig viele Seiten, sprich Fälle hat, in denen der Quellcode für die unterschiedlichen Aktionen enthalten ist. Über einen Selektor wird gewählt, welcher Fall ausgeführt wird. An den Selektor kann ein *Boolean* angeschlossen werden, dann hat die Case-Struktur nur zwei Fälle, TRUE und FALSE. Ein Beispiel dafür ist in **Abbildung 5** dargestellt. Ist der Schalter eingeschaltet, wird der Fall TRUE ausgeführt, die Leuchte wird also eingeschaltet und in dem Textfeld erscheint „Das Licht ist an!“. Ist der Schalter aus, wird der Fall FALSE ausgeführt; die Leuchte wird ausgeschaltet und das Textfeld enthält „Das Licht ist aus!“. Werden mehr als zwei Fälle benötigt, kann an den Selektor auch ein Zahlen- oder Textelement angeschlossen werden, z.B. ein *Enum*. In diesem Fall kann die Case-Struktur beliebig viele Fälle haben. Ein Fall kann auch mehrere Elemente des *Enums* abdecken (vgl. [6], S. 170f.).

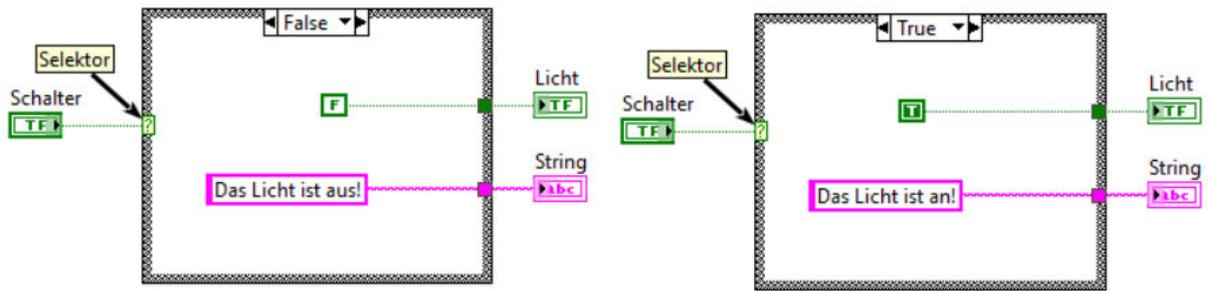


Abbildung 5: Beispiel für eine Case-Struktur

## Eventstruktur

Eine Eventstruktur hat ebenfalls mehrere Fälle, die jeweils ausgeführt werden, wenn ein zuvor definiertes Ereignis eintritt. Ein Event kann das Anklicken eines Elements, das Drücken einer Taste oder die Wertänderung eines Elements sein. Bis ein solches Event eintritt, verweilt das Programm in dem Timeout-Fall. Er kann ebenfalls Quellcode enthalten, der aber nur ausgeführt wird, wenn die Timeout-Zeit abgelaufen ist, ohne dass ein anderes Event eingetreten ist. Die Timeout-Zeit muss in Millisekunden definiert und mit dem Timer verbunden sein. Ist die Timeout-Zeit -1, ist das gleichbedeutend mit einer unendlich großen Zahl, sodass der Timeout-Fall niemals ausgeführt wird (vgl. [8]). Das ist zu vermeiden, da so das Programm blockiert werden könnte. In **Abbildung 6** ist eine beispielhafte Eventstruktur dargestellt. Die Eventstruktur hat zwei Events, die eintreten können. Wird dazu innerhalb der Timeoutzeit von 1000 ms einer der beiden Buttons „Gelb“ oder „Blau“ gedrückt, wird der entsprechende Fall ausgeführt. Einem Text wird die gewählte „Glücksfarbe“ hinzugefügt. Läuft die Timeout-Zeit ab, ohne dass einer der Buttons betätigt wurde, wird der Timeout-Fall ausgeführt und es wird in diesem Fall „keine“ als Glücksfarbe ergänzt.

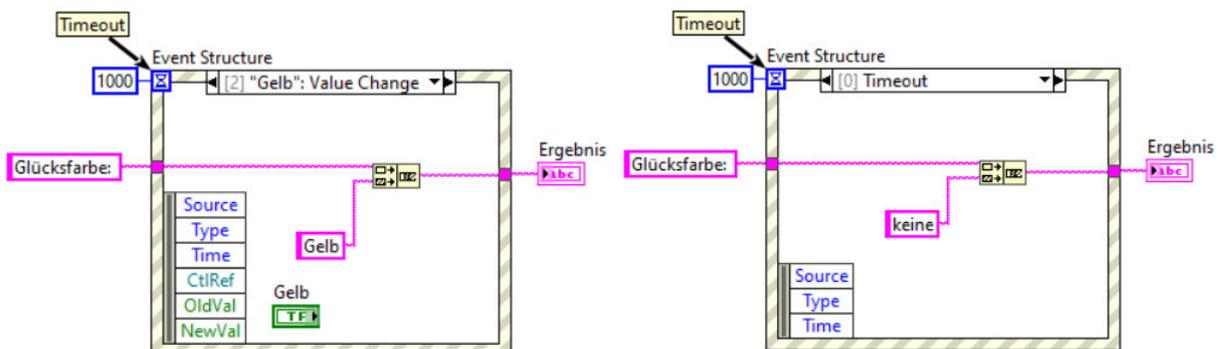


Abbildung 6: Beispiel für eine Eventstruktur

## Lokale, globale und funktionable globale Variable

In LabVIEW gibt es drei Arten von Variablen. Lokale Variablen werden verwendet, wenn Werte innerhalb eines VIs mehrfach benötigt werden und dies nicht durch direkte Verbindungen realisiert werden kann. Dabei kann sich die Variable wie ein Kontroll- oder wie ein Anzeigeelement verhalten, d.h. der Wert des zugehörigen Elements kann ausgelesen oder mit der Variable geändert (geschrieben) werden (vgl. [6], S. 183f.). Globale Variablen funktionieren ähnlich, allerdings auch über VI-Grenzen hinaus. Sie haben ein *Front Panel* und können mehrere Bedienelemente enthalten. Es muss berücksichtigt werden, dass mit jeder Variable eine Kopie der Daten entsteht, was besonders bei komplexen Datenstrukturen zu Verzögerungen im

Programmablauf führen kann. Problematisch ist außerdem bei beiden Variablen, dass die zeitliche Reihenfolge des Zugriffs nicht festgelegt ist (vgl. [6], S.188ff.). In datenflussbasierten Programmiersprachen, wie in LabVIEW verwendet, können Prozesse ohne Weiteres parallel laufen und es kann zu sogenannten Wettbewerbssituationen kommen. Dadurch kann es passieren, dass nicht die aktuelle Version der Daten verwendet wird oder mehrere Versionen entstehen; Programmabläufe und Ergebnisse sind außerdem nicht reproduzierbar (vgl. [6], S. 190ff.). Das Problem wird mit einer funktionalen globalen Variable (FGV) umgangen. Damit kann immer nur ein Prozess zurzeit ausgeführt werden, es wird also immer die gleiche Instanz des Programms aufgerufen. So wird sichergestellt, dass keine Kopien der Daten entstehen und immer der aktuelle Wert verwendet wird (vgl. [9]). In **Abbildung 7** ist der beispielhafte Aufbau einer FGV im Blockdiagramm dargestellt. Sie besteht aus einer While-Schleife, die nach der ersten Iteration wieder beendet wird. In dieser einen Iteration wird eine Case-Struktur ausgeführt, die sich in der Schleife befindet. Mit dem Selektor der Case-Struktur ist ein *Enum* verbunden, das die verschiedenen Aktionen der FGV enthält. Die Case-Struktur hat einen Fall für jede Aktion und pro Durchlauf der FGV kann genau eine dieser Aktionen ausgeführt werden. Über ein Shift-Register können Daten von einem Aufruf zum nächsten gespeichert werden.

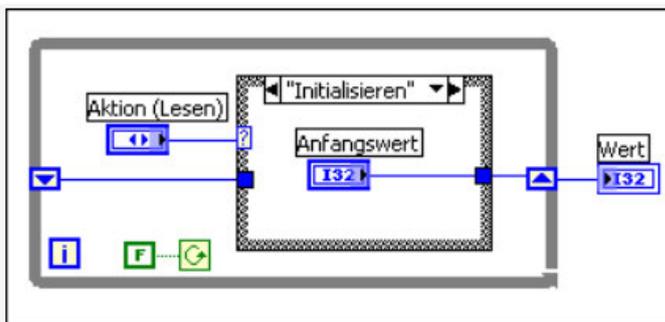


Abbildung 7: Aufbau einer funktionalen globalen Variable ([9])

### State Machine

Eine *State Machine* basiert auf dem Prinzip eines endlichen Automaten, der hauptsächlich aus Zuständen, Ereignissen und Aktionen besteht. Ereignisse bewirken Zustandsänderungen und damit verbundene Aktionen. Dabei sind die Übergänge eindeutig festgelegt und damit auch der Ablauf des Automaten. Das Prinzip eignet sich besonders gut, um strukturierte Programme in LabVIEW aufzubauen, am einfachsten ist das mit einer Case-Struktur in einer While-Schleife. Eine flexible Programmsteuerung wird durch ein Shift-Register und ein *Enum* am *Case Selector* erreicht, so kann in jedem Fall der Case-Struktur ein neuer Zustand gewählt werden. Mit einem Auswahlelement kann der folgende Zustand von aktuellen Bedingungen abhängig gemacht werden. Ein Beispiel dafür ist in **Abbildung 8** dargestellt. Dadurch ergibt sich allerdings der Nachteil, dass die Programmablaufsteuerung auf die Fälle der Case-Struktur verteilt ist und damit nicht direkt erkennbar. Wird die *State Machine* als Moore-Automat betrachtet wird, sind die Ereignisse den Zuständen zugeordnet; die Elemente des *Enums* sind die Ereignisse, jeder Fall der Case-Struktur entspricht einem Zustand und der enthaltene Programmcode der auszuführenden Aktion. Wird die *State Machine* als Mealy-Automat entworfen, gibt es nur einen einzigen Zustand, in den sie immer wieder zurückkehrt. Die Elemente im *Enum* sind ebenfalls die Ereignisse, die nun aber Aktionen zugeordnet sind. Ein Fall der Case-Struktur entspricht also einer Aktion bzw. Reaktion auf das entsprechende Ereignis (vgl. [6], S. 410ff.).

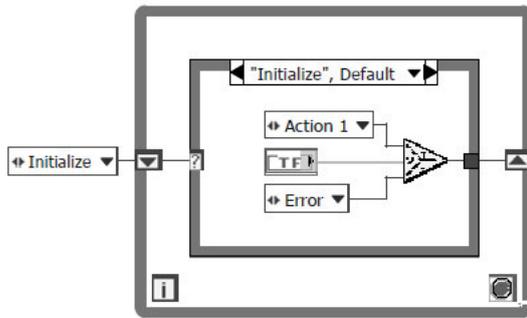


Abbildung 8: Aufbau einer State Machine in LabVIEW ([6])

National Instruments stellt das Zusatzpaket *JKI State Machine* zur Verfügung, das ein Basisprogramm mit einer *State Machine* enthält; dieses kann als Mealy-Automat betrachtet werden. Die *JKI State Machine* kann in ein leeres VI eingefügt und dann beliebig an die Bedürfnisse des Nutzers angepasst werden. In **Abbildung 9** ist das Ablaufdiagramm einer solchen *JKI State Machine* dargestellt. Die auszuführenden Aktionen entsprechen den Fällen der Case-Struktur und sind als String in einem Shift-Register enthalten, dem in jedem Fall weitere Aktionen hinzugefügt werden können. Sind alle Fälle bzw. Aktionen aus der Liste abgearbeitet, kehrt die *State Machine* in den ersten Fall der Case-Struktur zurück, der eine Eventstruktur enthält. Das entspricht dann dem einen Zustand des Mealy-Automaten. Die Fälle der Eventstruktur sind Ereignisse des Automaten; tritt ein Event ein, wird der entsprechende Eventfall ausgeführt und die zugehörigen Aktionen über die Liste aufgerufen. Wenn kein Event eintritt, wird der Timeout-Fall ausgeführt, sofern eine Timeout-Zeit vorgegeben wurde.

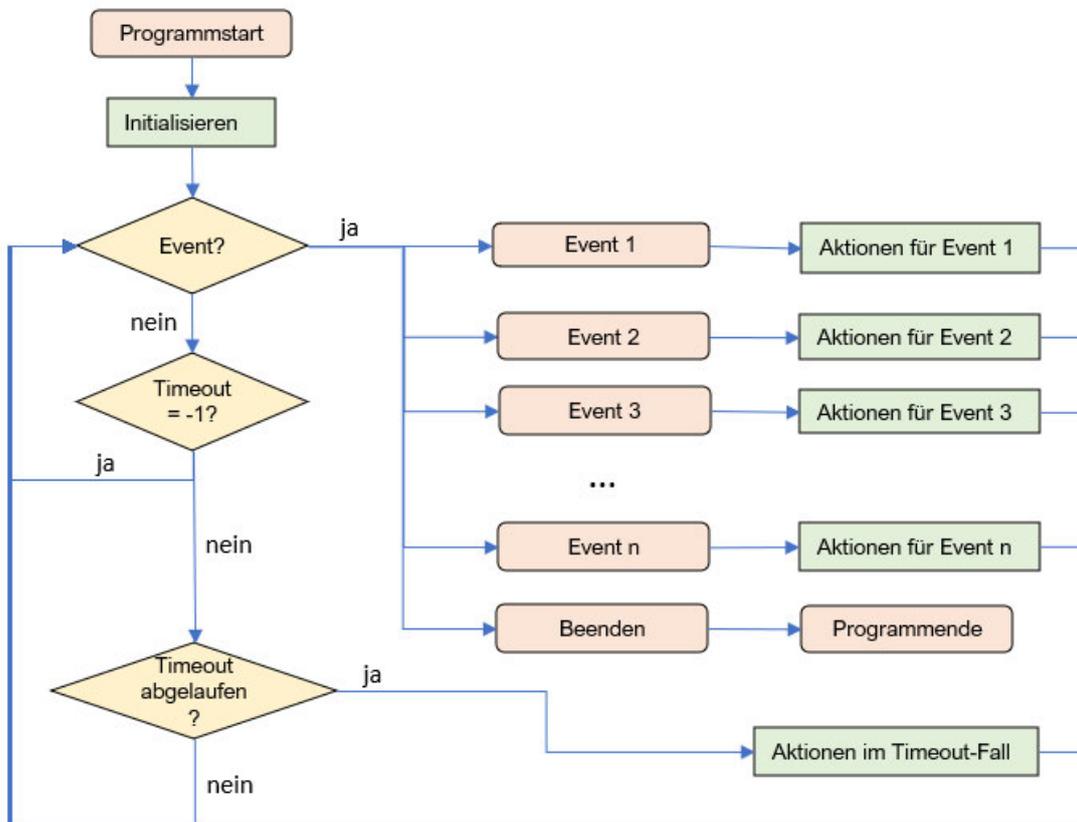


Abbildung 9: Ablaufdiagramm einer JKI State Machine

Durch einen Rechtsklick auf den Rahmen der Case-Struktur kann der „JKI State Machine Explorer“ aufgerufen werden, der alle Fälle dieser auflistet (→ **Abbildung 10**). Bei Start des Programms wird automatisch der Fall „Macro: Initialize“ aufgerufen, der alle Initialisierungsfälle aufruft (→ **Abbildung 11**). Außerdem wird im Fall „Data: Initialize“ ein Cluster mit allen Variablen initialisiert und in ein weiteres Shift-Register gespeichert, auf die kann dann in jedem anderen Fall zugegriffen werden (→ **Abbildung 12**). Um eine ungewollte Veränderung der Daten zu vermeiden, ist es sinnvoll, sie in Unterclustern zu sortieren und diese als *Type Definition* zu speichern. Der Fall „UI: Initialize“ dient dazu, den Variablen Startwerte zuzuweisen.

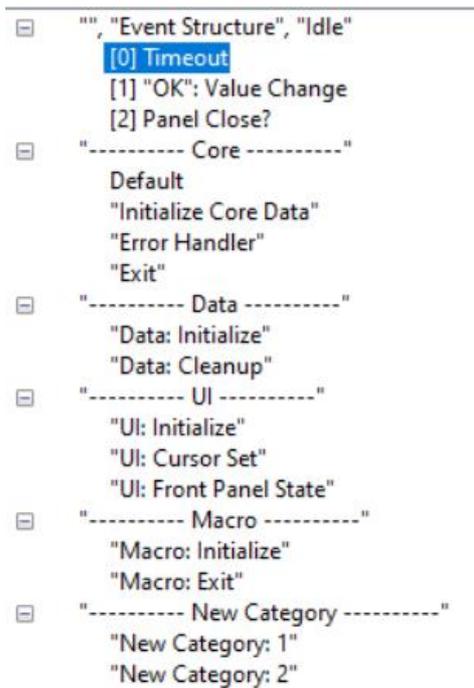


Abbildung 10: JKI State Machine Explorer

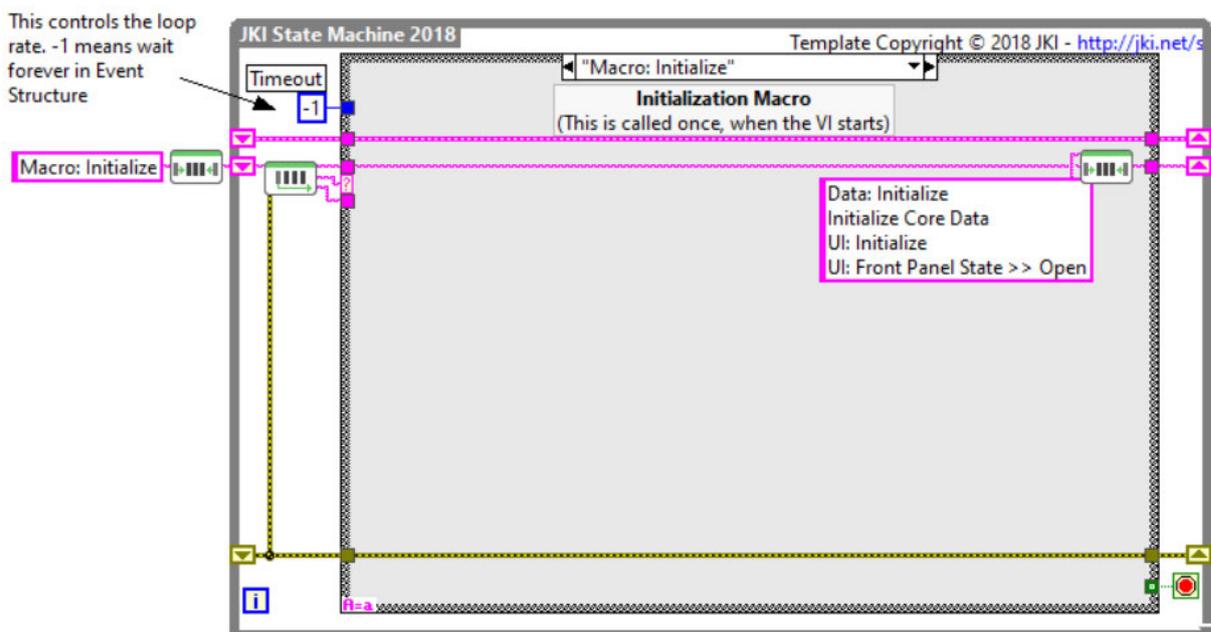


Abbildung 11: Block Diagram einer leeren JKI State Machine im Fall „Macro: Initialize“

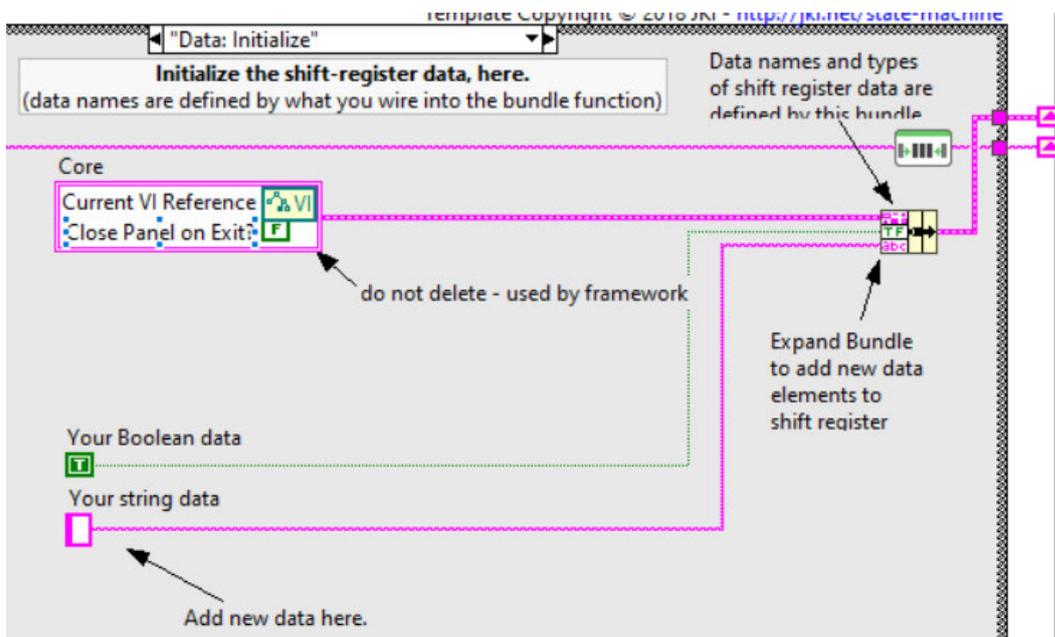


Abbildung 12: Fall "Data: Initialize" einer leeren JKI State Machine

Für ähnliche Funktionen kann der gleiche Fall verwendet werden. Dazu muss der Programmcode, der sich unterscheidet, innerhalb des Falls in einer weiteren Case-Struktur untergebracht sein. An den *Case Selector* dieser wird der „Argument“-Eingang der großen Case-Struktur angeschlossen. Die Fälle der inneren Case-Struktur müssen genau dieselben Bezeichnungen wie die möglichen Argumente haben. In **Abbildung 13** ist dafür beispielhaft der Fall „UI: Front Panel State“ dargestellt; darin können mehrere Funktionen zum Status des *Front Panels* erfüllt werden. Aufgerufen wird der Fall über die Liste, indem das Argument dem Fallnamen mit zwei Pfeilen angefügt wird (Bsp.: „UI: Front Panel State >> Open“ in **Abbildung 11**).

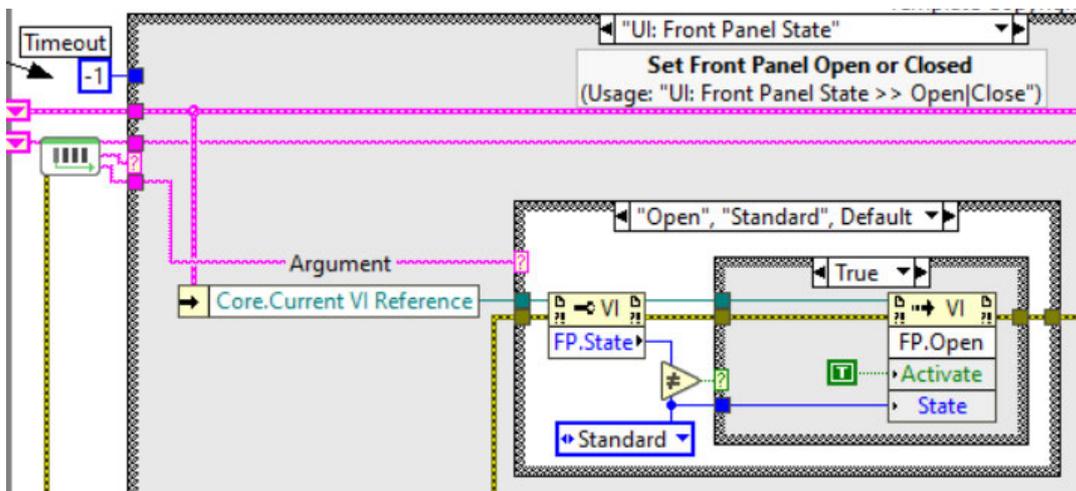


Abbildung 13: Fall "UI: Front Panel State" mit Argument-Case-Struktur in einer JKI State Machine

## VISA-Funktionen

Die VISA-Funktionen werden verwendet, um programmierbare Geräte anzusprechen und können in LabVIEW der Toolpalette entnommen werden. Alle diese Funktionen benötigen den Gerätenamen, womit die bestehende Sitzung verwendet wird. Die wichtigsten werden in **Tabelle 3** beschrieben.

Element	Beschreibung
<p style="text-align: center;"><b>VISA Open</b></p>	<p>Öffnet eine Sitzung mit dem in „VISA resource name“ definierten Gerät ([7]).</p>
<p style="text-align: center;"><b>VISA Close</b></p>	<p>Schließt die Sitzung mit dem in „VISA resource name“ definierten Gerät ([7]).</p>
<p style="text-align: center;"><b>VISA Write</b></p>	<p>Sendet den Befehl aus dem Eingang „write buffer“ an das in „VISA resource name“ definierte Gerät ([7]).</p>
<p style="text-align: center;"><b>VISA Read</b></p>	<p>Liest den <i>Output</i>-Speicher des in „VISA resource name“ definierten Gerätes aus und schreibt das Ergebnis in den Ausgang „read buffer“ ([7]).</p>

Tabelle 3: Ausgewählte VISA-Funktionen mit Beschreibungen (vgl. [7])

### 3 Aufgabenstellung und Lastenheft

Am *Institut Erneuerbare Energien* befindet sich ein Versuchsstand in der Entwicklung, bestehend aus einer Spannungsquelle, einer Last und einer Blei-Gel-Batterie. In **Abbildung 14** ist der geplante Aufbau dargestellt. Für Spannungsquelle und Last werden in einem ersten Schritt programmierbare Geräte der Hersteller Keysight und Itech verwendet, die extern angesteuert werden sollen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung geeigneter Schnittstellenprogramme für die beiden Geräte zur Verwendung in diesem Versuchsstand.

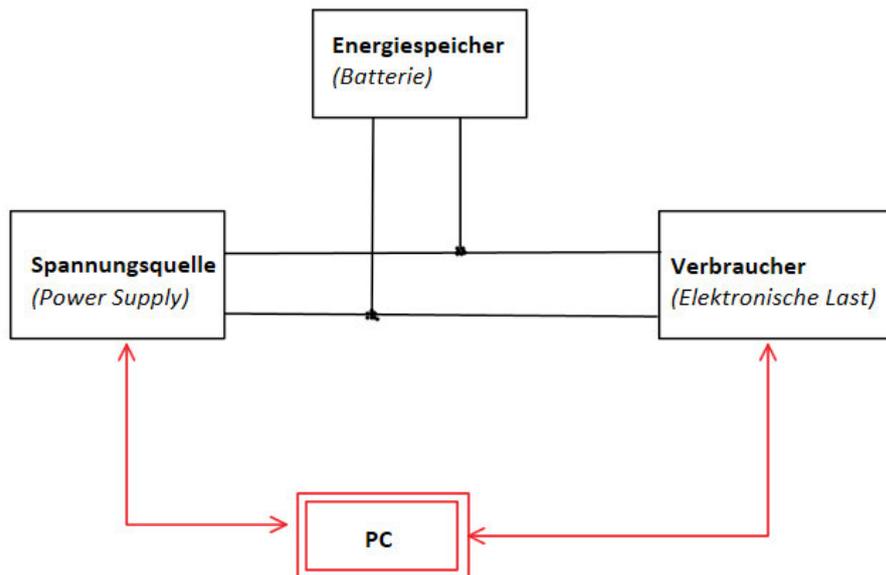


Abbildung 14: Aufbau des Hybridversuchsstandes

Darunter fallen Analyse und Bewertung möglicher Programmierungsansätze in LabVIEW, sowie die Definition aller Anforderungen an das Schnittstellenprogramm. Es werden mehrere Programmteile entwickelt, die universell eingesetzt werden können und alle Anforderungen erfüllen. Geeignete Versuche werden entwickelt und durchgeführt, um alle Funktionen zu prüfen. Dazu gehört, Werte für Spannung und Last einzustellen und aktuelle Werte oder auftretende Fehler auszulesen. Gerätegrenzen werden bestimmt, indem die maximale Abtastrate ermittelt und der Verlauf einer Sprungantwort untersucht wird. Eine durch simultane Ansteuerung von Spannungsquelle und Elektronischer Last auftretende Fehlfunktion muss ausgeschlossen werden. In der Dokumentation werden alle Ergebnisse und eine Erläuterung zur weiteren Verwendung der Programme festgehalten.

Für den Versuchsstand sollen ein *Power Supply* der Firma Keysight und eine Elektronische Last des Herstellers Itech verwendet werden. Die Schnittstellenprogramme sind für diese beiden Geräte konzipiert, aber nicht zwingend nur für diesen Versuchsaufbau. Sie können universell bei der Nutzung eines oder beider Geräte eingesetzt werden.

Die Anforderungen an die Schnittstellenprogramme für *Power Supply* und Elektronische Last sind im Folgenden aufgelistet:

1. Die Steuerprogramme werden mit LabVIEW geschrieben.
2. Es gibt je ein VI für die Steuerung von Elektronischer Last und *Power Supply*.
3. Mit den VIs können alle Funktionen der Geräte verwendet werden, in der Regel ohne die Befehle zu kennen.
4. Alle Funktionen können ausgeführt werden, alle enthaltenen Aufgaben werden erfüllt und es treten keine Fehler am Gerät auf.
5. Die Programme können die Zeit seit dem letzten Aufruf überwachen und eine Mindestwartezeit zwischen zwei Durchläufen garantieren.
6. Die VIs haben eine Beschreibung in LabVIEW (*Context Help*).
7. Verwendete *SubVIs* haben eine Beschreibung der Funktion und Anwendung in LabVIEW (*Context Help*).
8. Für die Einbindung in übergeordnete Programme wird kein zusätzlicher Code benötigt außer der Ein- und Ausgangselemente. Der Nutzer muss den Aufbau des VIs nicht kennen, um es zu verwenden.
9. Die VIs können allgemein zur Steuerung der Geräte verwendet werden und sind nicht an eine bestimmte Anwendung gebunden.
10. Es treten keine Fehler bei Langzeitversuchen (Nutzung über 30 min) auf.
11. Es gibt Nutzungshinweise, die bei der Verwendung beachtet werden sollten, um einen sinnvollen Betrieb zu gewährleisten.
12. Ein Beispiel-Programm zeigt die Einbindung der VIs in eine *JKI State Machine*.

## 4 Programme

Die beiden Geräte *Power Supply* und Elektronische Last haben jeweils ein eigenes Schnittstellenprogramm, für die Umsetzung der Anforderungen wird in beiden Fällen eine funktionale globale Variable (FGV) verwendet (→ **Kap. 2.4**). Im Wesentlichen wird damit der Vorteil genutzt, immer die gleiche Instanz des Programms aufrufen zu können. Die FGV befindet sich dabei in einer äußeren Fehler-Case-Struktur und wird nur ausgeführt, wenn zu Beginn des Programms kein Fehler vorliegt.

### 4.1 Steuerprogramm für das Power Supply

Das Steuerprogramm für das *Power Supply* (Keysight E36231A) hat sieben Eingänge und vier Ausgänge, die in **Tabelle 4** genauer beschrieben werden. In **Abbildung 15** ist deren Anordnung dargestellt. Die Eingänge „device name“ und „PS\_functions“ sind notwendig, damit das VI ausgeführt werden kann. Das Fehlercluster sollte ebenfalls immer verbunden sein, um auftretende Fehler innerhalb des VIs aufzuzeichnen, ist aber nicht zwingend erforderlich. Bei den „set“- und „read“-Funktionen muss jeweils der Ein- oder Ausgang für den in Klammern angegebenen Datentyp verbunden werden. Wird an den Eingang „wait time“ nichts angeschlossen, wird ein Standardwert von null verwendet. Das Steuerprogramm des *Power Supply*s hat die Bezeichnung `PS_FGV.vi`.

	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung
Eingänge	device name	<i>VISA resource name</i>	enthält den Gerätenamen und die Sitzung des Keysight E36231A ( <i>Power Supply</i> )
	PS_functions	<i>Enum</i>	<i>Type Definition</i> ; enthält alle ausführbaren Funktionen des <i>Power Supply</i> s
	double_in	<i>Double</i>	Parameter für die „set double“-Funktionen
	boolean_in	<i>Boolean</i>	Parameter für die „set boolean“-Funktionen
	string_in	<i>String</i>	Parameter für die „set string“-Funktionen (nur „set free command (string)“)
	error in	<i>Cluster</i>	enthält einen <i>Boolean</i> (TRUE, wenn Fehler auftritt), einen <i>Integer</i> (Fehlernummer) und einen <i>String</i> (Fehlertext); muss leer sein, damit die FGV ausgeführt wird
	wait time	<i>Integer</i>	Mindestwartezeit zwischen zwei Durchläufen in Millisekunden
Ausgänge	double_out	<i>Double</i>	Ergebnis von „read double“-Funktionen
	boolean_out	<i>Boolean</i>	Ergebnis von „read boolean“-Funktionen
	string_out	<i>String</i>	Ergebnis von „read string“-Funktionen
	error out	<i>Cluster</i>	Ausgangsfehlercluster

Tabelle 4: Ein- und Ausgänge des Programms `PS_FGV.vi`

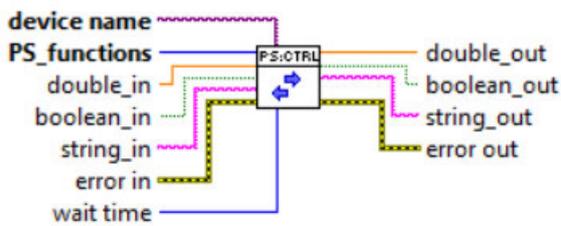


Abbildung 15: Ein- und Ausgänge des Programms *PS\_FGV.vi*

Das Funktions-Enum „PS\_functions“ enthält für das *Power Supply 72* Funktionen. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind die Funktionen in vier Kategorien eingeteilt; die Case-Struktur hat für jede dieser Kategorien einen eigenen Fall. Die Kategorien teilen die Funktionen nach dem Datentyp des verwendeten Ein- oder Ausgangsparameter ein; außerdem gibt es einen Initialisierungsfall und einen Schließfall. In **Tabelle 5** sind die Fälle der Case-Struktur aufgelistet und beschrieben. In den Fällen drei bis sechs befindet sich eine zweite Case-Struktur. Für eine vollständige Auflistung der Funktionen inklusive Beschreibung und Verweis siehe **Tabelle A - 4** im **Anhang A**. In **Anhang B** ist das vollständige Blockdiagramm des Steuerprogramms enthalten.

	<b>Erste Case-Struktur</b>	<b>Beschreibung</b>
1.	„initialize“	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eröffnung einer Gerätesitzung mit dem <i>Power Supply</i></li> <li>- „Remote with Lock“-Modus</li> <li>- Löschen der <i>Event Register</i> aller Registergruppen</li> <li>- „Reset“</li> </ul>
2.	„close“	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Output</i> abschalten</li> <li>- „Reset“</li> <li>- Löschen der <i>Event Register</i> aller Registergruppen</li> <li>- „Lokal“-Modus einstellen</li> <li>- Gerätesitzung schließen</li> </ul>
3.	„without parameter“	Zweite Case-Struktur: je ein Fall für alle Funktionen ohne Ein- oder Ausgangsparameter
4.	„set and read boolean“	Zweite Case-Struktur: <ul style="list-style-type: none"> <li>- „set boolean“-Funktionen</li> <li>- „read boolean“-Funktionen</li> </ul>
5.	„set and read double“	Zweite Case-Struktur: <ul style="list-style-type: none"> <li>- „set double“-Funktionen</li> <li>- „read double“-Funktionen</li> <li>- „read Measure Current (double)“</li> <li>- „read Measure Voltage (double)“</li> </ul>
6.	„set and read string“	Zweite Case-Struktur: je einen Fall für alle Funktionen mit einem <i>String</i> als Ein- oder Ausgangsparameter

Tabelle 5: Fälle der ersten Case-Struktur in dem Programm *PS\_FGV.vi*

1. Um auf das *Power Supply* zugreifen zu können, muss eine Gerätesitzung eröffnet werden. Das passiert im ersten Fall „initialize“ mit dem Element *VISA-Open* (→ **Kap. 2.4**), daher muss die Funktion „init ()“ immer zu Beginn eines Gerätezugriffs durchgeführt

werden. Für alle VISA-Funktionen wird ein Gerätename benötigt, der im Initialisierungsfall in ein Shift-Register gespeichert wird und dadurch in allen anderen Fällen zur Verfügung steht (→ **Abbildung 16**). Außerdem werden weitere Starteinstellungen getroffen (→ **Tabelle 5**).

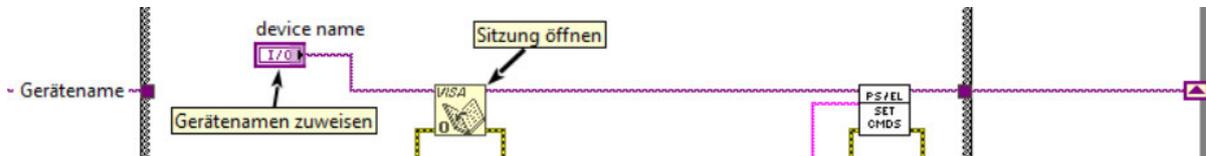


Abbildung 16: Ausschnitt aus dem ersten Fall in *PS\_FGV.vi*

Wird die Funktion „*init()*“ mehrmals ausgeführt, werden auch mehrere Gerätesitzungen geöffnet. Grundsätzlich können mehrere Sitzungen parallel offen sein, die Zahl ist jedoch begrenzt. Auch wird der Zugriff auf das Gerät dadurch langsamer und es kann zu Fehlern kommen. Es sollte also vermieden werden, mehrere Sitzungen parallel zu öffnen.

2. Im zweiten Fall „*close*“ wird neben einigen Schlusseinstellungen die bestehende Sitzung mit dem Element *VISA-Close* geschlossen (**Abbildung 17**). Dieser Fall muss immer zum Schluss eines Gerätezugriffs ausgeführt werden.

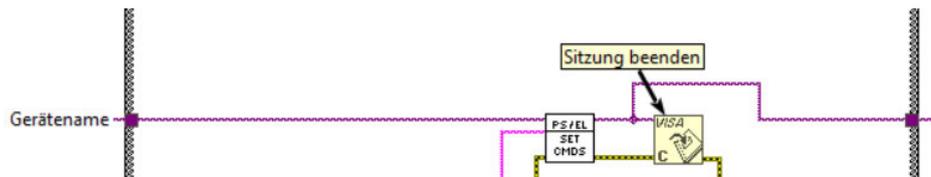


Abbildung 17: Funktion *VISA-Close* im Fall "close" (*PS\_FGV.vi*)

3. Im dritten Fall („without parameter“) hat die zweite Case-Struktur einen Fall für jede zugehörige Funktion. Es wird jeweils das *SubVI set\_cmds.vi* (→ **Kap. 4.3.1**) verwendet, um den entsprechenden Befehl an das *Power Supply* zu senden.
4. Der vierte Fall enthält alle Funktionen der Kategorie „boolean“. In der zweiten Case-Struktur innerhalb des Falls gibt es zwei Fälle; der erste führt die „set boolean“-Funktionen aus und verwendet dazu den Eingangsparameter „boolean\_in“, der zweite enthält den Code für die „read boolean“-Funktionen und schreibt das Ergebnis in den Ausgangsparameter „boolean\_out“. Im „set boolean“-Fall kommt ebenfalls das *SubVI set\_cmds.vi* zum Einsatz, für die „read“-Funktionen wird das *SubVI set\_and\_get.vi* verwendet (→ **Kap. 4.3.2**). Die Befehle für „set“- und „read“-Funktionen sind gleich, es wird lediglich der Parameter oder ein Fragezeichen ergänzt (→ **Kap. 2.3**), daher sind die Befehle in einem *1D-Array* des Typs *String* enthalten; die Reihenfolge entspricht der der zugehörigen Funktionen im Funktions-Enum. Mit dem *SubVI PS\_build\_cmd.vi* (→ **Kap. 4.3.3**) wird der richtige Befehl ausgewählt und passend entweder der Parameter oder ein Fragezeichen ergänzt.
5. Der fünfte Fall der ersten Case-Struktur hat die Kategorie „double“, es werden also alle Funktionen mit einem *Double* als Ein- oder Ausgangsparameter bearbeitet. Der Aufbau entspricht dabei exakt dem vierten Fall, allerdings hat die zweite Case-Struktur zwei zusätzliche Fälle für das Auslesen der Messwerte von Strom und Spannung.

6. Im sechsten Fall („set and read string“) hat die zweite Case-Struktur wieder einen eigenen Fall für jede Funktion, zwei davon sind etwas gesondert zu betrachten. Zum einen die Funktion „set free command (string)“, die als einzige Funktion das *String*-Eingangselement verwendet; damit kann ein manueller Befehl eingegeben werden. Zum zweiten die Funktion „read buffer (string)“: Hier wird der Ausgangsspeicher ausgelesen, in den das Gerät die Antwort auf eine Frage schreibt. Ist der Ausgangsspeicher leer, gibt es bei Ausführen dieser Funktion einen Fehler. Wird mit dem manuellen Befehl eine Frage an das Gerät gesendet, muss mit dieser Funktion die Antwort ausgelesen werden.

Das *Power Supply* braucht eine gewisse Zeit, um die empfangenen Befehle zu verarbeiten und zu reagieren. Werden zu schnell weitere Befehle gesendet, kann es zu Fehlern oder falschen Messwerten kommen. Um das zu verhindern, kann eine Zeit vorgegeben werden („wait time“), die die FGV mindestens abwarten muss, bevor sie erneut ausgeführt wird. In **Abbildung 18** ist die Umsetzung im Programm dargestellt. In ein weiteres Shift-Register wird die Zeit des letzten Durchlaufs gespeichert und bei jedem Aufruf wird überprüft, ob die Zeit seit dem letzten Durchlauf größer ist als die vorgegebene Mindestwartezeit. Ist das nicht der Fall, wird die Differenz abgewartet, bevor die gewünschte Funktion ausgeführt wird. Um zu garantieren, dass die Wartezeit vor dem Ausführen der Funktion geprüft und die aktuelle Zeit erst nach Ausführen der Funktion gespeichert wird, werden jeweils Frequenzstrukturen verwendet, durch die das Fehlercluster geleitet wird.

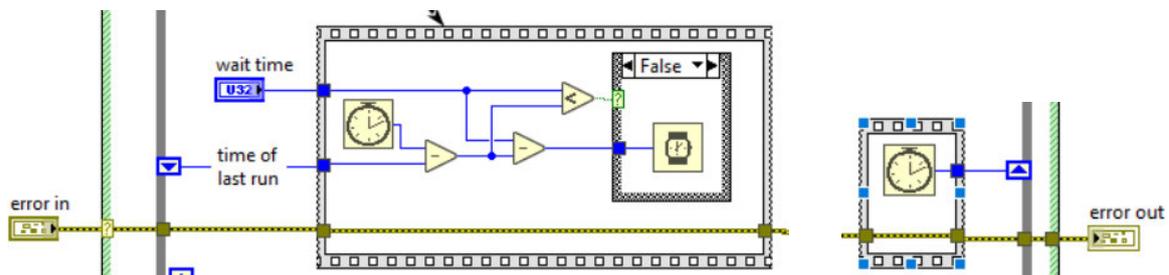


Abbildung 18: Mindestwartezeit zwischen zwei Aufrufen des Programms *PS\_FGV.vi*

## 4.2 Steuerprogramm für die Elektronische Last

Das Steuerprogramm für die Elektronische Last (Itech 8812C) hat die gleichen sieben Eingänge und vier Ausgänge wie das Programm des *Power Supplys* (→ **Abbildung 19**) und ist darüber hinaus identisch aufgebaut. Es hat die Bezeichnung *EL\_FGV.vi*.

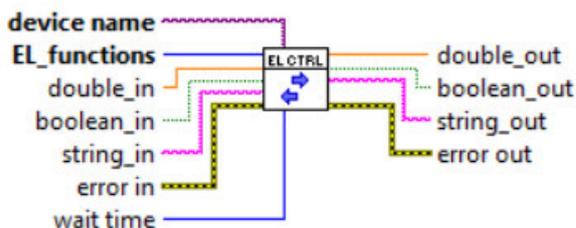


Abbildung 19: Ein- und Ausgänge des Programms *EL\_FGV.vi*

Das *Enum* für die FGV heißt „EL\_functions“ und ist ebenfalls eine *Type Definition*; es enthält 92 Funktionen, die bei der Elektronischen Last ausgeführt werden können. Erforderliche Eingänge sind wie zuvor „device name“ und „EL\_functions“ und für die „set“- und „read“-Funktionen jeweils der Ein- oder Ausgang des richtigen Datentyps. In **Tabelle 6** sind die Fälle der ersten Case-Struktur aufgelistet, die weitgehend denen des *Power Supplys* entsprechen, für eine genauere Beschreibung siehe daher **Kap. 4.1**. Für eine vollständige Auflistung der Funktionen siehe **Tabelle A - 3** im **Anhang A**. Das *Block Diagram* des Steuerprogramms für die Elektronische Last ist ebenfalls in **Anhang B** enthalten.

	<b>Erste Case-Struktur</b>	<b>Beschreibung</b>
1.	„initialize“	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eröffnung einer Gerätesitzung</li> <li>- Abschalten des <i>Inputs</i></li> <li>- „Remote with Lock“-Modus</li> <li>- Löschen der <i>Event Register</i> aller Registergruppen</li> <li>- Löschen der Fehlerliste</li> <li>- „Reset“</li> </ul>
2.	„close“	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Input</i> abschalten</li> <li>- „Reset“</li> <li>- Löschen der <i>Event Register</i> aller Registergruppen</li> <li>- Löschen der Fehlerliste</li> <li>- „Lokal“-Modus einstellen</li> <li>- Gerätesitzung schließen</li> </ul>
3.	„without parameter“	Zweite Case-Struktur: je ein Fall für alle Funktionen ohne Ein- oder Ausgangsparameter
4.	„set and read boolean“	Zweite Case-Struktur: <ul style="list-style-type: none"> <li>- „set boolean“-Funktionen</li> <li>- „read boolean“-Funktionen</li> </ul>
5.	„set and read double“	Zweite Case-Struktur: <ul style="list-style-type: none"> <li>- „set double“-Funktionen</li> <li>- „read double“-Funktionen</li> <li>- „read Measure Current (Double)“</li> <li>- „read Measure Voltage (Double)“</li> </ul>
6.	„set and read string“	Zweite Case-Struktur: je einen Fall für alle Funktionen mit <i>String</i> als Ein- oder Ausgangsparameter

Tabelle 6: Fälle der ersten Case-Struktur in dem Programm *EL\_FGV.vi*

Im Vergleich zu dem Programm des *Power Supplys* gibt es hier im Initialisierungsfall und im Schließfall noch eine zusätzliche Funktion. Weiterhin wird in den Fällen vier und fünf zur Befehlsgenerierung ein *SubVI* mit der Bezeichnung *EL\_build\_cmd.vi* (→ **Kap. 4.3.3**) verwendet. Dieses hat den gleichen Aufbau und auch die gleiche Funktion wie zuvor, verwendet jedoch das *Enum* „EL\_functions“ als Eingangselement.

Das Steuerprogramm der Elektronischen Last speichert ebenfalls die Zeit des letzten Durchlaufs und prüft bei einem erneuten Aufruf, ob die Mindestwartezeit eingehalten wurde.

## 4.3 SubVIs

Programmcode, der in der gleichen Form häufiger verwendet wird, kann in einem Unterprogramm (*SubVI*) zusammengefasst und in jedem *Block Diagram* beliebig oft wieder eingefügt werden. **Tabelle 7** bietet eine Übersicht über die *SubVIs*, die in den Steuerprogrammen eingesetzt werden, inklusive Funktion und Verwendung. Im Folgenden werden diese dann genauer beschrieben.

Bezeichnung SubVI	Funktion	Verwendung
set_cmds.vi	sendet einen Befehl an das Gerät	PS_FGV.vi und EL_FGV.vi; alle „set“-Funktionen und Funktionen ohne Parameter
set_and_get.vi	sendet eine Frage an das Gerät und liest den Ausgangsspeicher aus	PS_FGV.vi und EL_FGV.vi; alle „read“-Funktionen
EL_build_cmd.vi	erstellt einen Befehl für die Elektronische Last	EL_FGV.vi; in den Fällen vier und fünf
PS_build_cmd.vi	erstellt einen Befehl für das <i>Power Supply</i>	PS_FGV.vi; in den Fällen vier und fünf
get_Bit_Nr.vi	liest aus einer Dezimalsumme die Bit-Nummern aus	keine
decimal_sum.vi	erstellt aus Bit-Nummern eine Dezimalsumme	keine

Tabelle 7: Verwendung und Funktionsübersicht der SubVIs

### 4.3.1 set\_cmds.vi

Das *SubVI* set\_cmds.vi sendet einen Befehl an das in „device name“ definierte Gerät. In **Tabelle 8** sind die Ein- und Ausgänge genauer beschrieben und in **Abbildung 20a** ist die Anordnung dieser dargestellt.

	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung
Eingänge	device name	VISA resource name	enthält den Gerätenamen; wird von der Funktion VISA-Write verwendet
	command	String	enthält den SCPI-Befehl
	error in	Cluster	Fehlercluster; wird von der Funktion VISA-Write verwendet
Ausgänge	device name out	VISA resource name	Kopie des Gerätenamen
	error out	Cluster	Fehlercluster am Ausgang; enthält im SubVI aufgetretene Fehler

Tabelle 8: Ein- und Ausgänge des SubVIs set\_cmds.vi

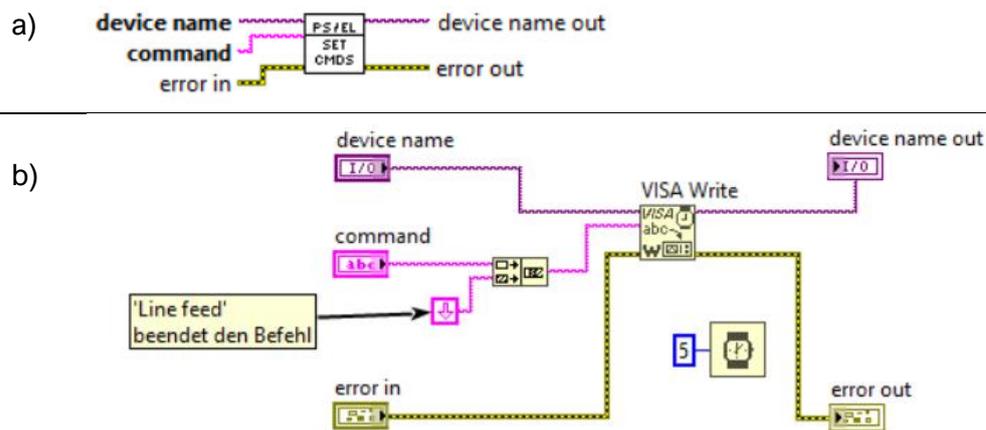


Abbildung 20: a) Icon und b) Block Diagram des SubVIs *set\_cmds.vi*

Innerhalb des *SubVIs* wird der Befehl in „command“ durch einen *Line Feed* ergänzt, der als Befehlsabschluss für das Gerät dient. Der Kern des *SubVIs* ist die Funktion *VISA-Write* (→ **Kap. 2.4**), die den Befehl an das Gerät sendet (→ **Abbildung 20b**). Außerdem wird die Ausführung um fünf Millisekunden verzögert, um einen fehlerfreien Ablauf zu garantieren. Dieses *SubVI* wird in allen „set“-Funktionen und Funktionen ohne Parameter in den Steuerprogrammen für *Power Supply* und Elektronische Last verwendet.

#### 4.3.2 set\_and\_get.vi

Das *SubVI* *set\_and\_get.vi* sendet einen Befehl an das in „device name“ definierte Gerät und liest anschließend den Ausgangsspeicher aus. In **Tabelle 9** sind die Ein- und Ausgänge des *SubVIs* genauer beschrieben und in **Abbildung 21a** die Anordnung dargestellt. Das *SubVI* enthält die Funktionen *VISA-Write* und *VISA-Read*, sowie ebenfalls eine Wartezeit von fünf Millisekunden, die einen fehlerfreien Ablauf garantiert. Die Funktion *VISA-Read* benötigt die Anzahl der zu lesenden Bytes als Eingang; die genaue Zahl ist nicht bekannt und variiert je nach Abfrage, daher wird hier eine ausreichend hohe Zahl von 256 Bytes verwendet (→ **Abbildung 21b**). Dieses *SubVI* wird in allen „read“-Funktionen der Steuerprogramme für Elektronische Last und *Power Supply* verwendet.

	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung
Eingänge	device name	VISA resource name	enthält den Gerätenamen; wird von der Funktion <i>VISA-Write</i> verwendet
	query cmd	String	enthält den SCPI-Befehl; muss mit einem Fragezeichen enden
	error in	Cluster	enthält das Fehlercluster; wird von der Funktion <i>VISA-Write</i> verwendet
Ausgänge	device name out	VISA resource name	Kopie des Gerätenamen
	result	String	enthält das Ergebnis der Abfrage (Inhalt des Ausgangsspeichers)
	error out	Cluster	Fehlercluster am Ausgang; enthält im <i>SubVI</i> aufgetretene Fehler

Tabelle 9: Ein- und Ausgänge des *SubVIs* *set\_and\_get.vi*

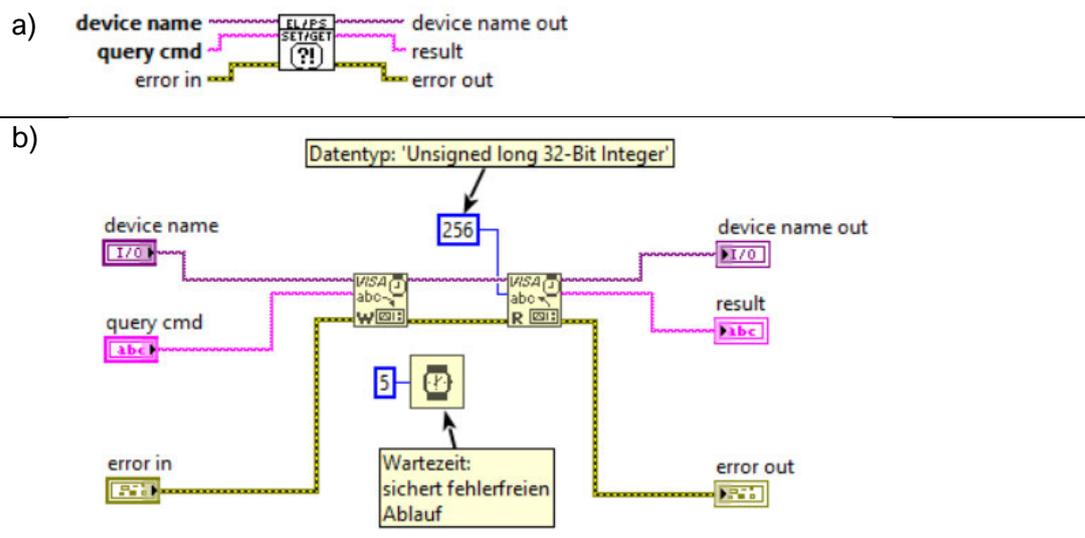


Abbildung 21: a) Icon und b) Block Diagram des SubVIs `set_and_get.vi`

### 4.3.3 EL\_build\_cmd.vi

Dieses *SubVI* erstellt Befehle für die im vierten und fünften Fall behandelten Funktionen der Elektronischen Last. So muss in der zweiten Case-Struktur nicht für jede Funktion ein eigener Fall erstellt werden, sondern nur einer für die „set“- und einer für die „read“-Funktionen. In der **Tabelle 10** sind die Ein- und Ausgänge des *VIs* genauer beschrieben, in **Abbildung 22** ist die Anordnung dieser dargestellt.

	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung
Eingänge	Boolean?	<i>Boolean</i>	TRUE für „set boolean“-Funktionen, FALSE für „set double“-Funktionen; Standardwert ist TRUE (nicht verwendet bei „read“-Funktionen!)
	EL_functions Index	<i>Integer</i>	Index der ersten Funktion der Kategorie im <i>Enum</i> „EL_functions“
	EL_functions	<i>Enum</i>	den Selektor der zweiten Case-Struktur an diesen Eingang anschließen
	set cmds	<i>1D Array (String)</i>	enthält Befehls-Array; Befehle der Funktionen einer Kategorie ohne Parameter und Fragezeichen
	double_in	<i>Double</i>	<i>Double</i> -Eingangselement des Steuerprogramms
	boolean_in	<i>Boolean</i>	<i>Boolean</i> -Eingangselement des Steuerprogramms
	error in	<i>Cluster</i>	enthält Fehlercluster; wird von der Funktion <i>VISA-Write</i> verwendet
	Read function?	<i>Boolean</i>	TRUE für <i>read</i> -Funktionen, FALSE „set“-Funktionen; Standardwert ist TRUE
Ausgänge	command	<i>String</i>	enthält den vollständigen Befehl
	error out	<i>Cluster</i>	Fehlercluster am Ausgang; enthält im <i>SubVI</i> aufgetretene Fehler

Tabelle 10: Ein- und Ausgänge des SubVIs `EL_build_cmd.vi`

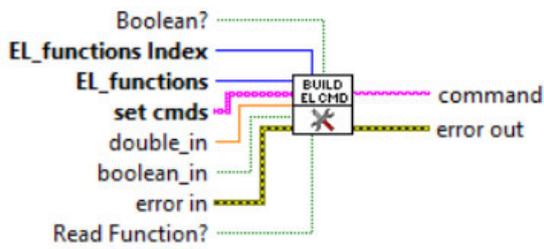


Abbildung 22: Icon des SubVIs *EL\_build\_cmd.vi*

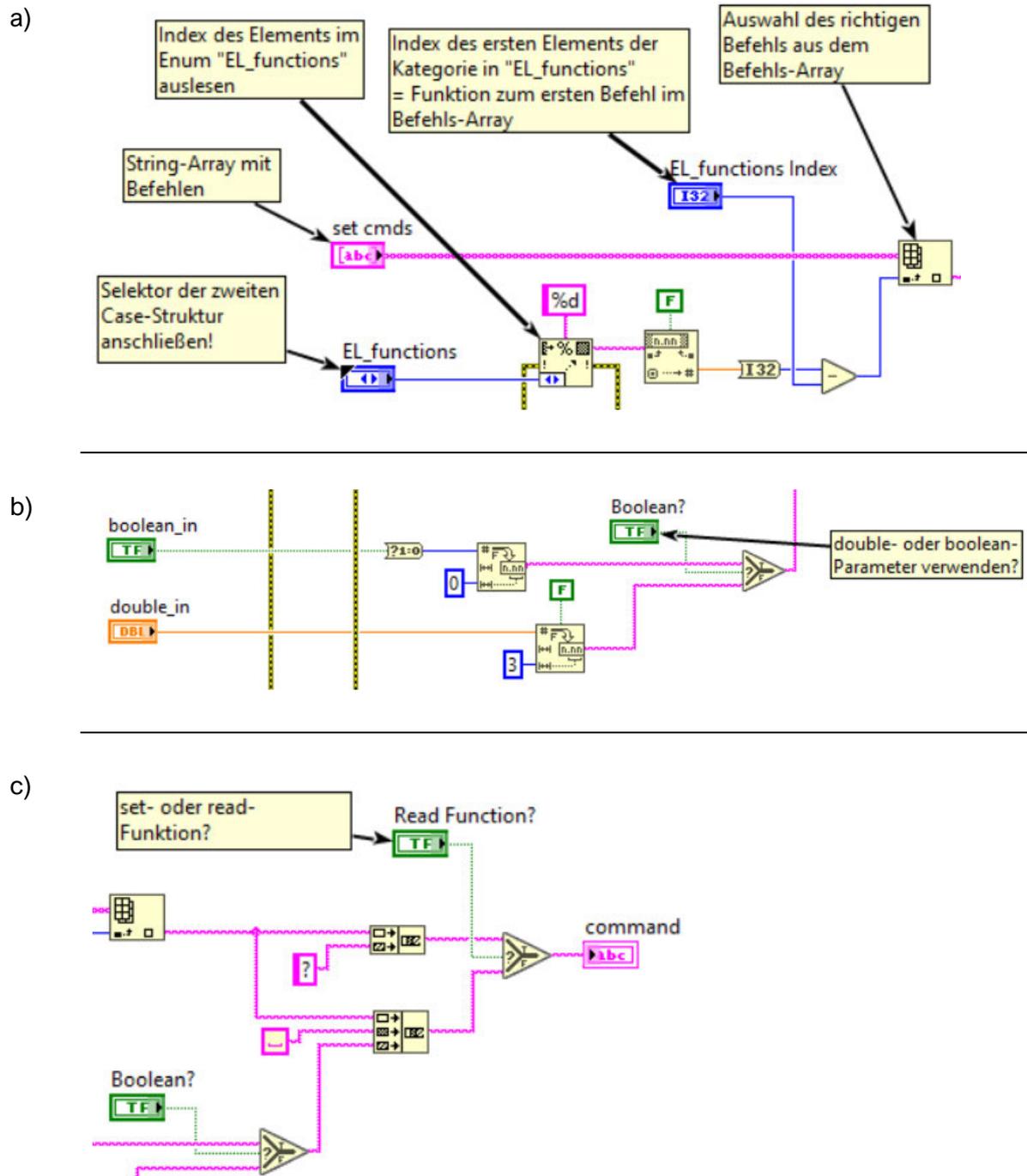


Abbildung 23: Ausschnitte aus dem Block Diagramm des SubVIs *EL\_build\_cmd.vi*

**Abbildung 23** zeigt Ausschnitte aus dem *Block Diagram* des *SubVIs*. Die Befehle für die Funktionen sind in dem *Array* des Typs *String* „set cmds“ enthalten und haben die gleiche Reihenfolge wie die zugehörigen Elemente in dem Funktions-*Enum*. In Ausschnitt a) ist dargestellt, wie der richtige Befehl aus dem *Array* ausgewählt wird. Ausschnitt b) zeigt die Funktion des Eingangs „Boolean?“ und Ausschnitt c) die Funktion des Eingangs „Read Function?“. Für eine Darstellung des gesamten *Block Diagrams* siehe **Abbildung B - 24** in **Anhang B**. Es gibt ein ähnliches *SubVI* für das *Power Supply*, das unterscheidet sich nur in dem Eingang für das Funktions-*Enum*, da es sich bei diesen Elementen um Typdefinitionen handelt. Das *SubVI* für das *Power Supply* hat die Bezeichnung `PS_build_cmd.vi`. Die Funktion des *SubVIs* `EL_build_cmd.vi` wird folgend mit einem Beispiel verdeutlicht.

An der Elektronischen Last soll ein neuer Sollwert für die Leistung eingestellt werden, also wird in dem Funktions-*Enum* die Funktion „set Power (double)“ gewählt. Die FGV befindet sich dann im fünften Fall der ersten Case-Struktur und dort im „set double“-Fall der zweiten Case-Struktur. Die gewählte Funktion ist das 68. Element in dem Funktions-*Enum* „EL\_functions“ und da die Nummerierung bei null beginnt, hat sie den Index 67. In der FGV ist mit dem Eingang „EL\_functions Index“ die Zahl 65 verbunden, dies ist der Index der ersten „set double“-Funktion. Nun wird aus diesen beiden Indizes die Differenz gebildet und als Index für die „Index Array“-Funktion verwendet. Auch hier wird bei null begonnen zu zählen, es wird also das dritte Element aus dem Befehls-*Array* ausgewählt. Das dritte Element ist der Befehl für die Funktion „set Power (double)“ ohne Parameter und lautet POW. Damit richtigerweise das *Double*-Eingangselement verwendet wird, muss mit dem „Boolean?“-Eingang eine FALSE-Konstante verbunden sein. Da eine „set“-Funktion ausgewählt wurde, muss mit dem „Read function?“-Eingang ebenfalls eine FALSE-Konstante verbunden sein.

In einem anderen Fall soll der Sollwert der Leistung anstatt gesetzt nur ausgelesen werden. Das Funktions-*Enum* hat den Wert „read Set Power (double)“ und die FGV befindet sich ebenfalls im fünften Fall der ersten Case-Struktur, nun aber im Fall „read double“ der zweiten Case-Struktur. Die gewählte Funktion hat den Index 30 in dem Funktions-*Enum* und die erste „read double“-Funktion, die im Fall „read double“ bearbeitet wird, hat den Index 28. Aus den beiden Indizes wird wieder die Differenz gebildet und damit der Befehl aus dem Befehls-*Array* ausgewählt; es ist der gleiche wie zuvor. Da sich die FGV aber in dem Fall „read double“ der zweiten Case-Struktur befindet, ist mit dem „Read function?“-Eingang eine TRUE-Konstante verbunden. Das bewirkt, dass der Befehl mit einem Fragezeichen ergänzt und so in einen Abfragebefehl umgewandelt wird. Die Funktionen „read Measure Current (double)“ und „read Measure Voltage (double)“ haben eigene Fälle in der zweiten Case-Struktur und werden daher nicht mit zu den „read double“-Funktionen gezählt, obwohl mit ihnen ebenfalls ein Zahlenwert ausgelesen wird.

#### 4.3.4 get\_Bit\_Nr.vi

Das *VI* `get_Bit_Nr.vi` liest die Bitnummern aus der Dezimalsumme aus. Es hat nur einen Ein- und einen Ausgang, in **Tabelle 11** sind diese genauer beschrieben. Dieses *VI* ist nicht in den Steuerprogrammen der Geräte enthalten, kann aber gut zur Auswertung von ausgelesenen Dezimalsummen genutzt werden.

	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung
Eingang	decimal sum	Double	Dezimalsumme; Ergebnis einer Abfrage eines Statusregisters
Ausgang	Bit_number	1D Array (Double)	Bitnummern, die in der Dezimalsumme enthalten sind

Tabelle 11: Ein- und Ausgang des VIs *get\_Bit\_Nr.vi*

In **Abbildung 24** ist das *Block Diagram* dieses VIs dargestellt. Es besteht aus zwei While-Schleifen; die äußere hält ein Shift-Register, in dem die Dezimalsumme gespeichert wird. In der inneren While-Schleife wird mit Hilfe der Iteration der höchste enthaltene Dezimalwert ermittelt und dann von der Summe abgezogen. Die gefundene Bitnummer wird über einen Indextunnel in ein Array gespeichert. Solange die verbleibende Summe nicht null ist, wird mit ihr genauso verfahren. Abschließend wird das Ausgangsarray sortiert und enthält nun die gesetzten Bits in aufsteigender Reihenfolge.

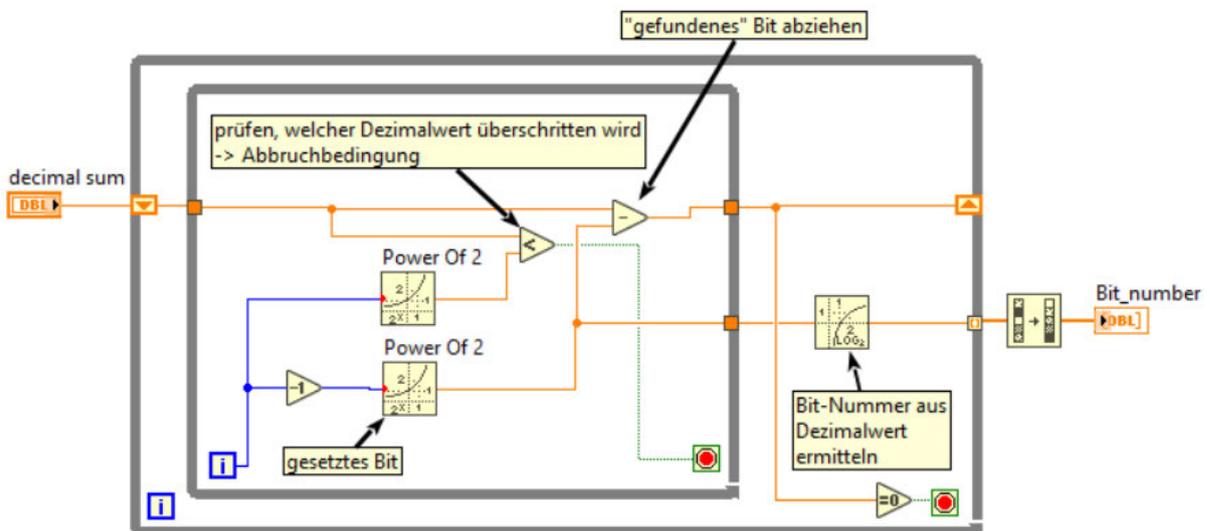


Abbildung 24: Block Diagram des SubVIs *get\_Bit\_Nr.vi*

#### 4.3.5 decimal\_sum.vi

In diesem VI wird die Dezimalsumme aus den eingegebenen Bitnummern gebildet, die benötigt wird, um Bits in den Registern zu setzen. Es hat ebenfalls nur einen Ein- und Ausgang, die in **Tabelle 12** genauer beschrieben sind. In **Abbildung 25** ist das *Block Diagram* dargestellt. Dieses VI wird ebenfalls nicht in den Steuerprogrammen der Geräte eingesetzt, kann aber genutzt werden, um eine Dezimalsumme zu bilden, die als Wert für die Funktionen zur Bearbeitung der Statusregister benötigt wird.

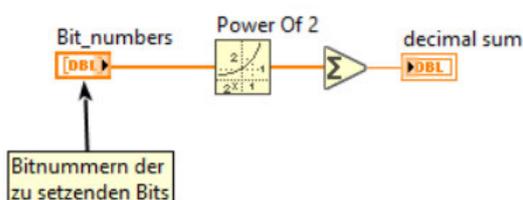


Abbildung 25: Block Diagram des VIs *decimal\_sum.vi*

	Bezeichnung	Datentyp	Beschreibung
Eingang	Bit_numbers	1D Array (Double)	enthält Bitnummern der Bits, die gesetzt/ aktiviert werden sollen
Ausgang	decimal sum	Double	Dezimalsumme; dient als Parameter der Funktionen zur Bearbeitung der Statusregister

Tabelle 12: Ein- und Ausgang des VIs *decimal\_sum.vi*

## 4.4 Beispiel: Control-VI

Das Programm *Control\_exmpl.vi* zeigt, wie die Einbindung der Steuerprogramme für *Power Supply* und Elektronische Last in eine *JKI State Machine* aussehen kann. Mit dem Programm können alle Funktionen der Steuerprogramme genutzt werden; häufig benötigte Funktionen sind sehr einfach über Buttons auf dem *Front Panel* erreichbar (→ **Abbildung 26**).

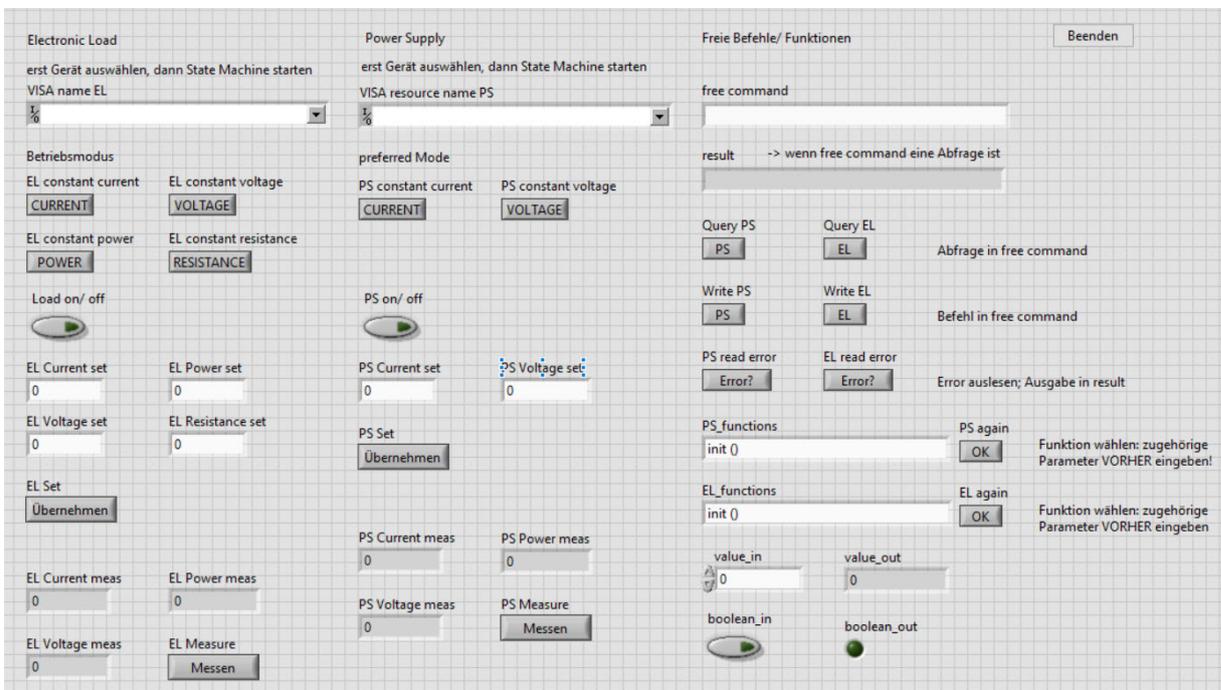


Abbildung 26: Front Panel des Programms *Control\_exmpl.vi*

In **Tabelle 13** sind die Elemente des *Front Panel* aufgelistet und deren Funktion bzw. Bedienung beschrieben.

<b>Front Panel Element</b>	<b>Beschreibung</b>
EL device name	Auswahl der richtigen Schnittstelle für die Elektronische Last; muss vor Start des Programms ausgewählt werden!
EL constant ...	Einstellung des Betriebsmodus an der Elektronischen Last ( <i>Constant Status</i> Funktion)
EL Set	Die in den Feldern „EL ... set“ eingetragenen Werte werden als Sollwerte an die Elektronische Last gesendet und eingestellt.
Load on/ off	Der <i>Input</i> der Elektronischen Last wird ein- oder ausgeschaltet.
EL Measure	An der Elektronischen Last wird eine Messung der aktuellen Werte durchgeführt und diese werden in die Anzeigen „EL ... meas“ geschrieben.
PS device name	Auswahl der richtigen Schnittstelle für das <i>Power Supply</i> ; muss vor Start des Programms ausgewählt werden!
PS Set	Die in den Feldern „PS ... set“ eingetragenen Werte werden als Grenzwerte am <i>Power Supply</i> eingestellt.
PS on/ off	Der <i>Output</i> des <i>Power Supplys</i> wird ein- oder ausgeschaltet.
PS Measure	Am <i>Power Supply</i> wird eine Messung der aktuellen Werte durchgeführt und diese werden in die Anzeigen „PS ... meas“ geschrieben.
Write PS / Write EL	Der Befehl in dem Feld „free command“ wird an das Gerät gesendet.
Query PS / Query EL	Der Befehl in „free command“ wird an das Gerät gesendet und das Ergebnis in das Anzeigefeld „result“ geschrieben; nur verwenden, wenn der freie Befehl eine Abfrage ist!
PS read error / EL read error	Die Fehlerliste des Gerätes wird ausgelesen und das Ergebnis in „result“ angezeigt.
PS_functions / PS again	Mit dem Auswahlfeld kann jede Funktion des <i>Power Supplys</i> ausgewählt werden, die die FGV ausführen kann. Soll die gleiche Funktion mehrfach nacheinander ausgeführt werden, muss der Button „PS again“ verwendet werden. „double_in“ und „boolean_in“ dienen als Parameter für die „set“-Funktionen; in „double_out“, „boolean_out“ und „result“ werden die Ergebnisse der „read“-Funktionen angezeigt.
EL_functions / EL again	Mit dem Auswahlfeld kann jede Funktion der Elektronischen Last ausgewählt und damit ausgeführt werden; soll sie mehrfach ausgeführt werden, „EL again“ verwenden! (→ Parameter und Ergebnisse wie bei „PS functions/ PS again“)

Tabelle 13: Beschreibung der Front Panel Elemente von *Control\_exmpl.vi*

In **Abbildung 27** ist der *JKI State Machine Explorer* dargestellt, der alle Fälle der Case-Struktur sowie die Fälle der Eventstruktur auflistet. Der *State Machine* wurden die beiden Kategorien „EL“ und „PS“ hinzugefügt, in denen alle gerätebezogenen Aktionen enthalten sind. In einigen Fällen werden mehrere Funktionen der Geräte zusammengefasst und über die Argumentfunktion aufgerufen. Ein Beispiel dafür ist die Einstellung des Betriebsmodus bei der Elektronischen Last in dem Fall „EL: set mode“. Auch durch die Zusammenfassung wird bei jedem Aufruf eines Falles der Case-Struktur nur eine einzelne Funktion ausgeführt. So sind die Zustände universell einsetzbar. Je nachdem, welche Funktionen der Geräte für das Programm benötigt werden, können dafür weitere Zustände erstellt werden. Die Buttons auf dem *Front Panel* sind mit Eventfällen der Eventstruktur verbunden. Wird ein Event durch Klicken des Buttons ausgelöst, werden in dem Eventfall die benötigten Aktionen der Warteschlange hinzugefügt und nacheinander ausgeführt. Benötigen die Funktionen einen Parameter aus den Feldern auf dem *Front Panel*, so wird zunächst der Fall „Data: get from FP“ aufgerufen, der alle Werte vom *Front Panel* ausliest. Sollen Werte aus den Geräten ausgelesen werden, wird zusätzlich der Fall „UI: refresh Front Panel“ aufgerufen, der die aktuellen Werte auf das *Front Panel* schreibt. Der Timeout-Fall der Eventstruktur wird in diesem Programm nicht verwendet.

```

[0] Timeout
[1] "PS Set": Value Change
[2] "PS on/ off": Value Change
[3] "PS Measure": Value Change
[4] "PS read error", "EL read error": Value Change
[5] "Write PS", "Write EL", "Query PS", "Query EL": Value Change
[6] "PS_functions": Value Change
[7] "EL constant current", "EL constant resistance", "EL constant power", "EL constant voltage": Value Change
[8] "EL Set": Value Change
[9] "Load on/ off": Value Change
[10] "EL Measure": Value Change
[11] "EL_functions": Value Change
[12] "PS again", "EL again": Value Change
[13] "Beenden": Value Change
[14] Panel Close?

"----- Core -----"
Default
"Initialize Core Data"
"Error Handler"
"Exit"

"----- Data -----"
"Data: Initialize"
"Data: get from FP"
"Data: Cleanup"

"----- UI -----"
"UI: Initialize"
"UI: init FP"
"UI: refresh Front Panel"
"UI: Cursor Set"
"UI: Front Panel State"

"----- Macro -----"
"Macro: Initialize"
"Macro: Exit"

"----- EL -----"
"EL: set mode"
"EL: init or close"
"EL: input state"
"EL: set value"
"EL: set free command"
"EL: free function"
"EL: measure"
"EL: read error"
"EL: read FP Data"
"EL: read buffer"

"----- PS -----"
"PS: init or close"
"PS: set pref mode"
"PS: set value"
"PS: output state"
"PS: set free command"
"PS: free function"
"PS: measure"
"PS: read error"
"PS: read buffer"
"PS: read FP data"

```

Abbildung 27: JKI State Machine Explorer des Programms *Control\_exmpl.vi*

Im Fall „Data: Initialize“ werden dem Datencluster zu Beginn drei *Cluster* hinzugefügt, die *Cluster* sind Typdefinitionen (→ **Abbildung 28**). Die enthaltenen Elemente sind in der **Tabelle 14** aufgelistet und ihre Verwendung beschrieben.

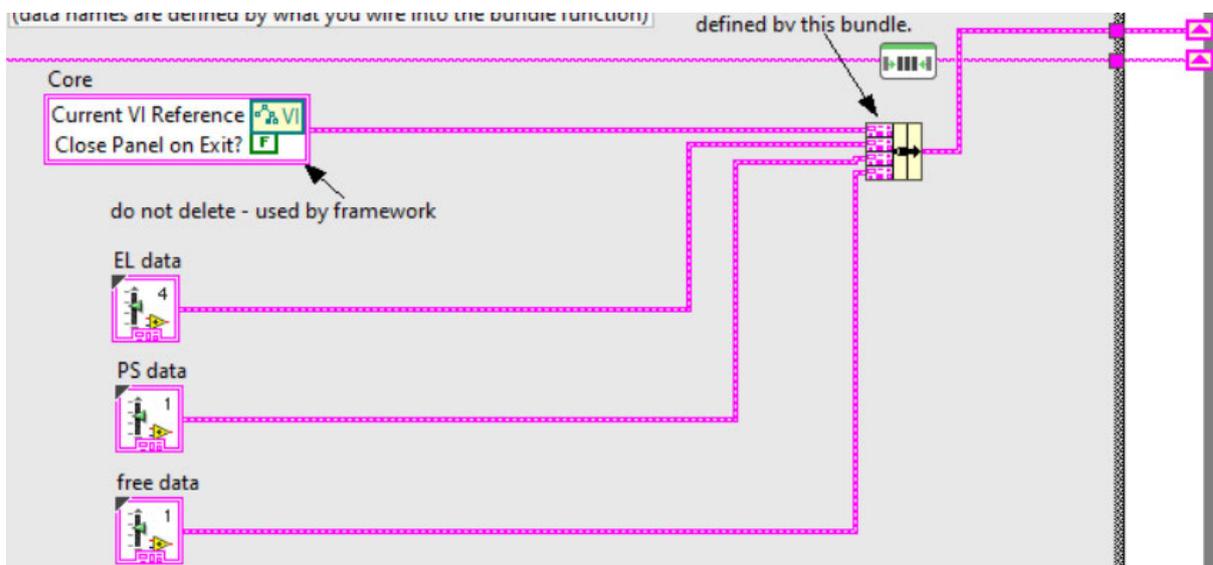


Abbildung 28: Initialisierung des Datenclusters der JK1 State Machine in *Control\_exmpl.vi*

	Element	Datentyp	Beschreibung
EL Data	EL device name	VISA session	Gerätename der Elektronischen Last
	I_set[A]	Double	Sollwert Strom in Ampere
	U_set[V]	Double	Sollwert Spannung in Volt
	P_set[W]	Double	Sollwert Leistung in Watt
	R_set[Ohm]	Double	Sollwert Widerstand in Ohm
	I_measure[A]	Double	Messwert Strom in Ampere
	U_measure[V]	Double	Messwert Spannung in Volt
	P_measure[W]	Double	Messwert Leistung in Watt
	input_state	Boolean	Status des <i>Inputs</i>
PS Data	PS device name	VISA session	Gerätename des <i>Power Supplys</i>
	I_set[A]	Double	Maximalwert Strom
	U_set[V]	Double	Maximalwert Spannung
	I_measure[A]	Double	Messwert Strom
	U_measure[V]	Double	Messwert Spannung
	P_measure[W]	Double	Messwert Leistung
		Output_State	Boolean
free data	read buffer	String	Ergebnis der „read string“-Funktionen
	PS_functions	Enum	Funktions-Enum des Power Supplys
	EL_functions	Enum	Funktions-Enum der Elektronischen Last
	boolean_out	Boolean	Ergebnis der „read boolean“-Funktionen
	boolean_in	Boolean	Parameter für „set boolean“-Funktionen
	value_in	Double	Parameter für „set double“-Funktionen
	value_out	Double	Ergebnis der „read double“-Funktionen
		min_wait_time[ms]	Integer

Tabelle 14: Elemente der Datencluster im Programm *Control\_exmpl.vi*

## 5 Messungen/ Untersuchungen

Mit den folgenden Experimenten werden verschiedene Aspekte der beiden Geräte *Power Supply* und Elektronische Last untersucht. Aus den Ergebnissen werden anschließend Nutzungshinweise abgeleitet, welche Einstellungen für die Geräte jeweils getroffen werden sollten. Um die Güte bestimmter Einstellungen und Messwerte zu beurteilen, wird in diesem Zusammenhang von einem Normal- oder Fehlbetrieb gesprochen. Dazu wird die Leistung an der Elektronischen Last betrachtet, die sich aus Strom und Spannung an dessen Eingang ergibt. Die Geräte laufen im Normalbetrieb, wenn die Leistung an der Last dem zu erwartenden Wert nahezu entspricht; siehe dazu **Kap. 2.2** zu den *Constant Status* Funktionen der Elektronischen Last. Im Fehlbetrieb ist die Leistung an der Elektronischen Last kleiner als ein Watt.

### 5.1 Oszilloskop

Mit einem Oszilloskop kann der Verlauf einer Spannung aufgezeichnet werden. Damit wird hier untersucht, wie sich die Spannung nach Einschalten der Geräte verhält. Die Elektronische Last befindet sich im Betriebsmodus CV, für die Grenzwerte des *Power Supplys* und den Sollwert der Elektronischen Last werden folgende Werte eingestellt:

$$U_{PS} = 8 \text{ V}$$

$$I_{PS} = 3 \text{ A}$$

$$U_{EL} = 6 \text{ V}$$

In **Abbildung 29** ist der Verlauf der Spannung nach Ein- und Ausschalten der Geräte über der Zeit in Millisekunden dargestellt. Gemessen wird die Spannung am Ausgang des *Power Supplys*.

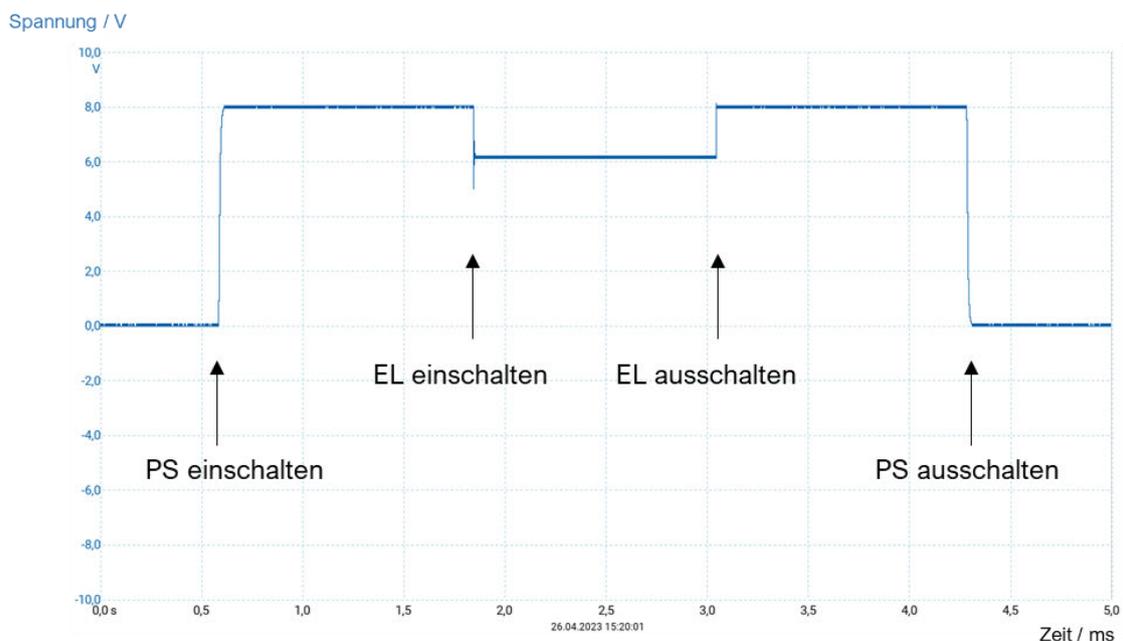


Abbildung 29: Spannungsverlauf bei Ein- und Ausschalten der Geräte

Es ist gut zu erkennen, dass die Spannung nach Einschalten des *Power Supplys* auf den Grenzwert ansteigt. Da der Sollwert an der Elektronischen Last niedriger ist, sinkt die Spannung nach Einschalten des *Inputs* an der Last auf einen Wert, der etwas über dem Sollwert liegt. Damit werden die Spannungsverluste in der Leitung ausgeglichen. Wird der *Input* wieder abgeschaltet, steigt die Spannung erneut auf den Grenzwert des *Power Supplys*.

Am *Power Supply* kann die Änderungsgeschwindigkeit der Spannung bei einem Sprung eingestellt werden. Als Standard ist dafür der Maximalwert eingestellt. Der Spannungsverlauf bei maximaler Änderungsrate ist in **Abbildung 30a** dargestellt, der maximale Wert beträgt 622,7 V/s. In einer weiteren Messung wird die Änderungsrate am *Power Supply* auf 50 V/s gesetzt, wodurch sich der Spannungsverlauf beim Anstieg verändert (→ **Abbildung 30b**).

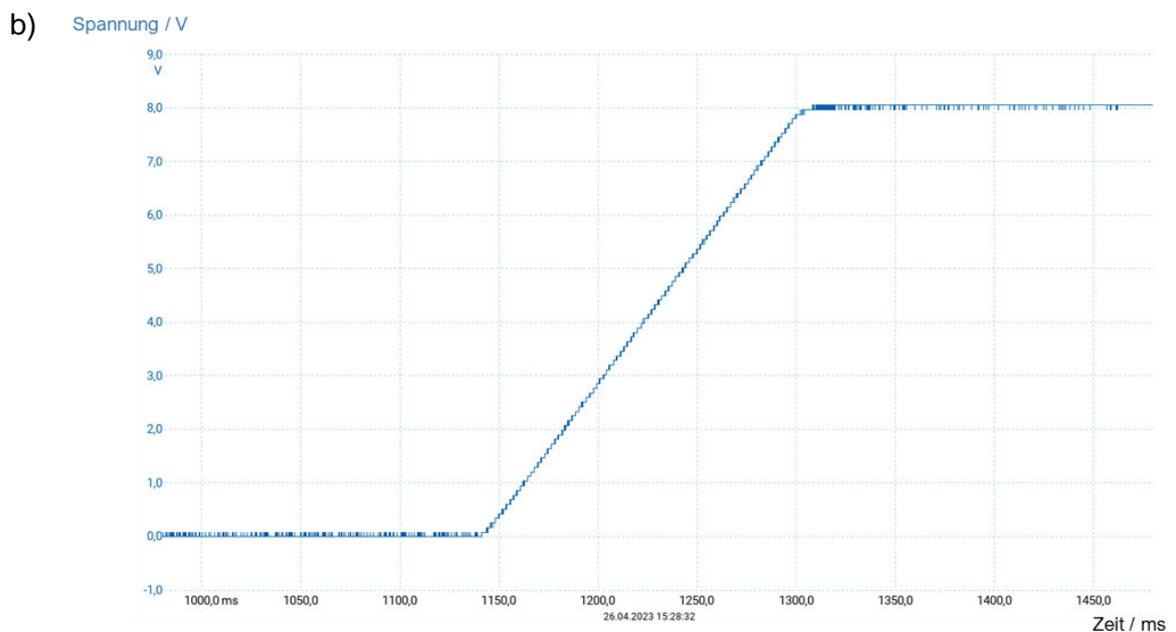
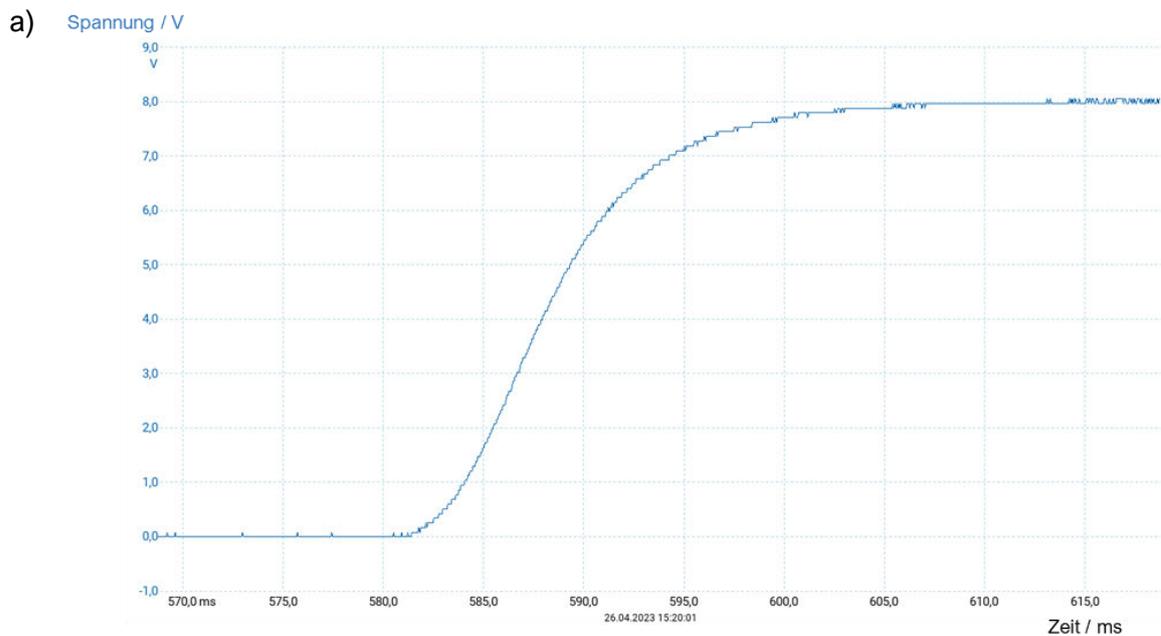


Abbildung 30: Spannungsverlauf beim Einschalten des *Power Supplys*: a) Änderungsrate maximal und b) bei 50 V/s

Beim Wechsel auf das neue Spannungsniveau nach dem Einschalten der Elektronischen Last schwingt die Spannung etwas über. Wird die Zeitachse etwas feiner eingestellt, ist das sehr gut zu erkennen (→ **Abbildung 31**). Der gesamte Einschwingvorgang dauert etwa 10 ms. Die eingestellte Änderungsrate des *Power Supplys* hat keinen Einfluss auf den Sprung beim Einschalten der Elektronischen Last.

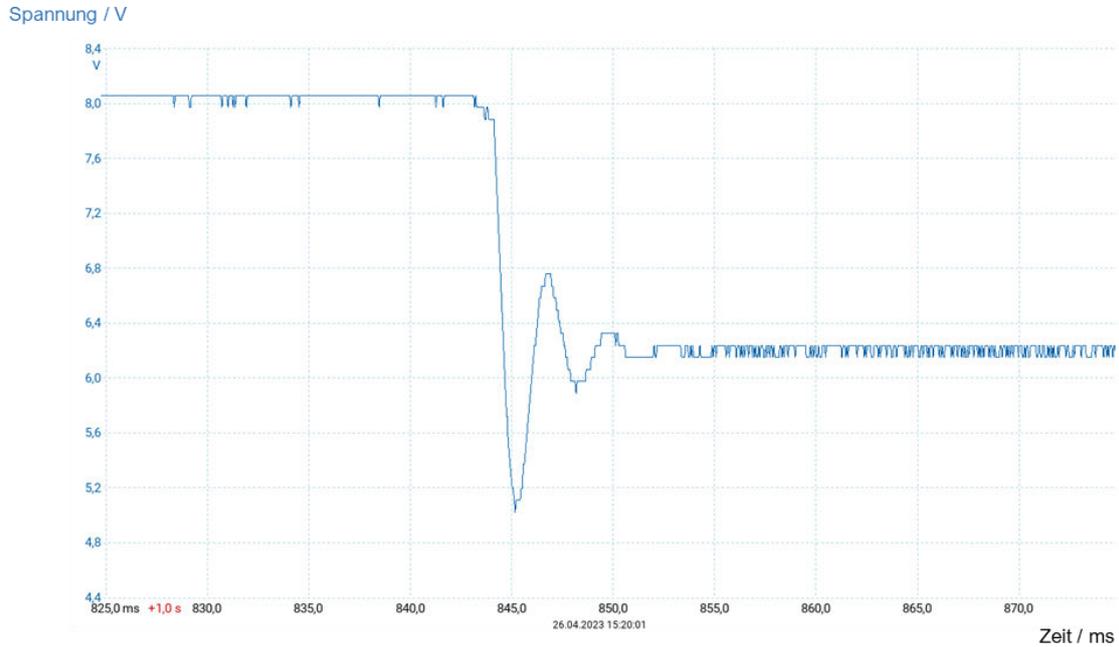


Abbildung 31: Spannungsverlauf beim Einschalten der Elektronischen Last

Wird die Last wieder ausgeschaltet, springt die Spannung wieder auf den Grenzwert des *Power Supplys* (→ **Abbildung 32**). Auch hier kommt es zu einem leichten Überschwingen, der ganze Vorgang geht aber deutlich schneller, bereits nach etwa einer Millisekunde ist das neue Spannungsniveau erreicht.

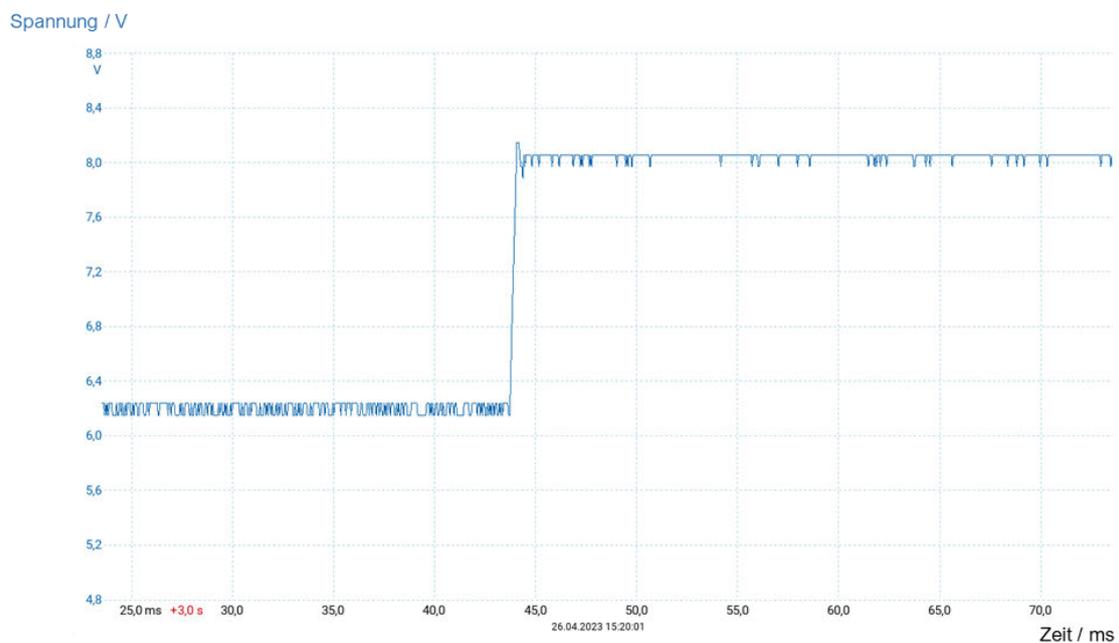
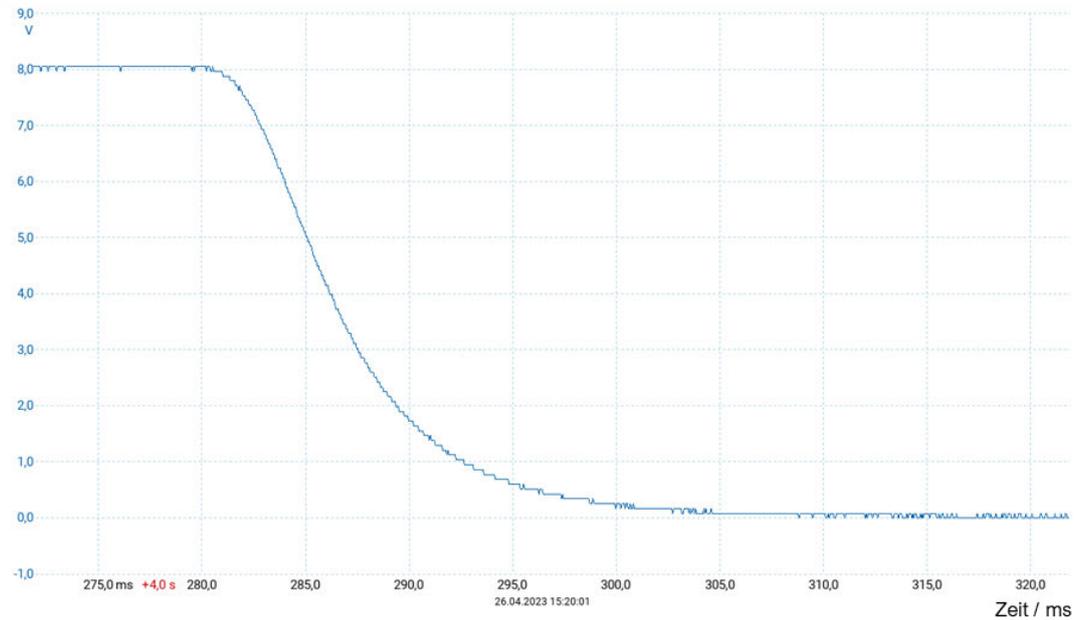


Abbildung 32: Spannungsverlauf beim Ausschalten der Elektronischen Last

Beim Ausschalten des *Power Supplys* sinkt die Spannung wieder auf null Volt, der Verlauf hängt dabei wieder eindeutig von der vorgegebenen Änderungsgeschwindigkeit ab, wie in **Abbildung 33a** und **b** zu erkennen.

a) Spannung / V



b) Spannung / V

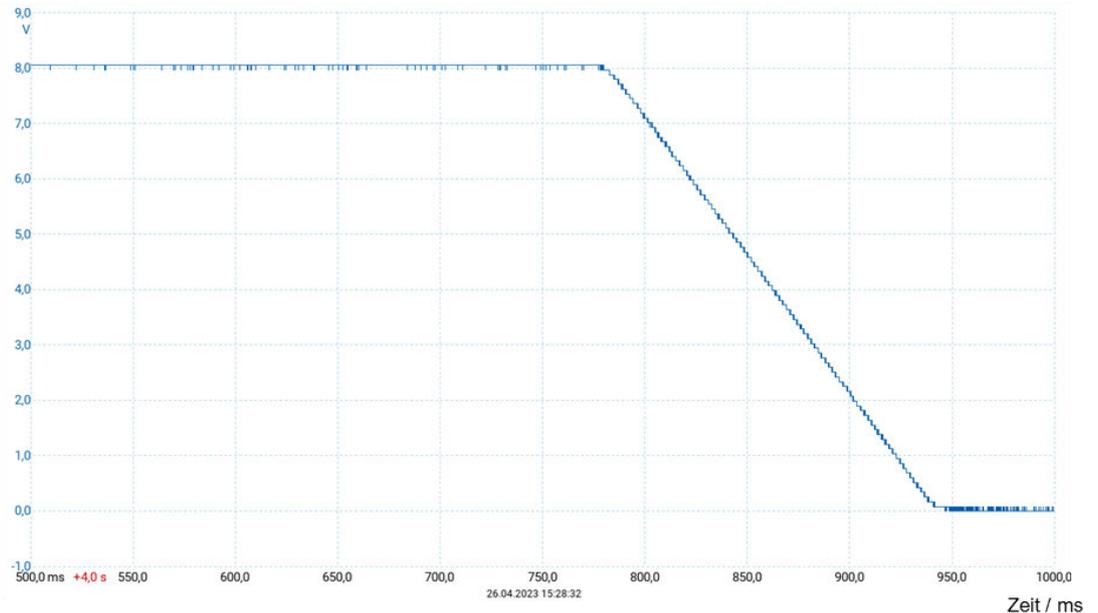


Abbildung 33: Spannungsverlauf beim Ausschalten des *Power Supplys* : a) Änderungsrate maximal und b) bei 50 V/s

## 5.2 Experiment 1: Kombi-Betrieb

Für die Anwendung im Hybridversuchsstand werden die beiden Geräte *Power Supply* und Elektronische Last gleichzeitig betrieben. Bei ersten Versuchen ist aufgefallen, dass beide Geräte in diesem sogenannten Kombi-Betrieb nicht immer wie gewünscht funktionieren. Für das *Power Supply* kann nur ein bevorzugter Betriebsmodus eingestellt werden. Ob es sich im Modus *Constant Current* oder *Constant Voltage* befindet, hängt von dem Widerstand am *Output* und somit von den Werten des angeschlossenen Verbrauchers, in diesem Fall der Elektronischen Last, ab. Für einen sicheren und sinnvollen Betrieb des Versuchsstandes ist es notwendig, das Verhalten beider Geräte sowohl einzeln als auch in Kombination genau zu kennen. In dem folgenden Experiment soll das Verhalten der beiden Geräte im Kombi-Betrieb genauer untersucht werden; die Messungen werden mit Hilfe des Programms `kombi_exp.vi` durchgeführt. Das Ablaufdiagramm dafür ist in **Abbildung 34** dargestellt. Das Programm stellt automatisch nach und nach die gewünschten Werte ein, nimmt Messwerte auf und speichert diese in ein Excel-Dokument. Das gesamte Experiment ist in die *Constant Status* Funktionen der Elektronischen Last gegliedert, alle Messungen mit dem gleichen Betriebsmodus gehören zu einer Messreihe. Innerhalb einer Messreihe werden weitere Einflussfaktoren untersucht; dazu gehören der bevorzugte Modus des *Power Supply*s und die Reihenfolge, in der die Geräte eingeschaltet werden. Außerdem wird der Einfluss von der VON-Funktion bei der Elektronischen Last und die Höhe der VON-Spannung untersucht. Jeder dieser Einflussfaktoren wird mit einer Reihe wechselnder Werte untersucht, die in einem Test zusammengefasst werden. Innerhalb eines Tests wird entweder der Grenzwert für Strom oder Spannung am *Power Supply* variiert, alle übrigen Einstellungen bleiben gleich; die variable Größe ist abhängig von der Messreihe. In der **Tabelle 15** sind die Variablen für die einzelnen Tests dargestellt, in **Tabelle 16** die variablen und konstanten Werte der einzelnen Messreihen. Für den ersten Durchgang wird in den Tests vier bis sieben der Standardwert (0,1 V) für die VON-Spannung verwendet. Danach können diese Tests beliebig oft mit einem manuell eingegebenen Wert für die VON-Spannung erneut durchgeführt werden. Zu beachten ist, dass zwischen Einschalten von *Power Supply*, Einschalten der Elektronischen Last und Aufnehmen der Messwerte jeweils eine Pause von einer Sekunde eingefügt wird. Die tatsächlich notwendige Länge dieser Pause wird in den Wartezeit-Messungen untersucht. In **Tabelle C - 1** bis **C - 6** in **Anhang C** befinden die relevanten Messwerte zu allen Messreihen dieses Experiments.

Test-nummer	VON-Funktion	Preferred Mode PS	Zuerst eingeschaltet
0	Aus	CV	PS
1			EL
2		CC	PS
3			EL
4	Ein	CV	PS
5			EL
6		CC	PS
7			EL

Tabelle 15: Variablen eines Experiments (Kombi-Betrieb)

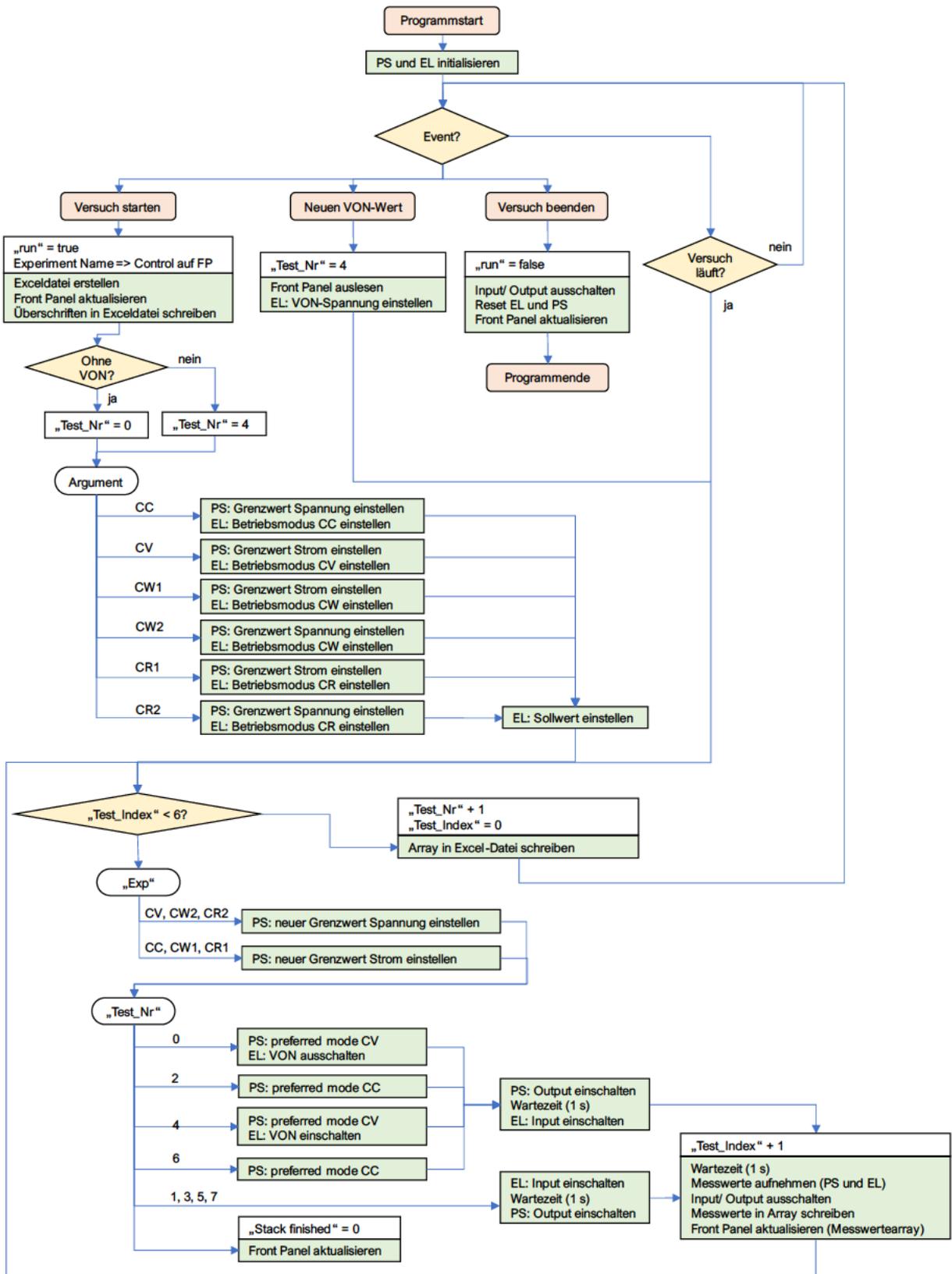


Abbildung 34: Ablaufdiagramm des Programms *kombi\_exp.vi* (Kombi-Betrieb)

Messreihe	Power Supply		Elektronische Last Sollwert
	I [A]	U [V]	
CC_1	[2, 4, 6, 8, 10]	10	4 A
CC_2	[3; 3,5; 4; 4,5; 5]	10	4 A
CV_1	3	[4, 6, 8, 10, 12]	6 V
CV_2	3	6,0 bis 8,2 (0,1er Schritte)	6 V
CW 1_1	3	[2, 4, 6, 8, 10]	8 W
CW 1_2	3	[2; 2,5; 3; 3,5; 4]	8 W
CW 2_1	[1, 2, 3, 4, 5]	6	8 W
CW 2_2	1,0 bis 2,0 (0,1er Schritte)	6	8 W
CR 1	4	[4, 8, 12, 16, 20]	6 Ohm
CR 2_1	[2, 3, 4, 5, 6]	10	6 Ohm
CR 2_2	[1, 2, 3, 4, 5]	12	6 Ohm

Tabelle 16: Variable und konstante Werte der Messreihen (Kombi-Betrieb)

### 5.2.1 Constant Current-Messreihen

In der ersten Messreihe (CC\_1) befindet sich die Elektronische Last in dem Modus CC, verwendete Soll- und Grenzwerte sind der **Tabelle 16** zu entnehmen. Bewusst sind die Werte so gewählt, dass der erste Grenzwert des *Power Supply*s unter dem Sollwert der Elektronischen Last liegt und der zweite diesem genau entspricht. Die Tests vier bis sieben werden mit den VON-Spannungswerten 0,1 V, 1 V, 2 V und 5 V durchgeführt. Eine Betrachtung der Messwerte ergibt, dass die Höhe der VON-Spannung keinen Einfluss auf die Messwerte hat, daher wird in der Messreihe CC\_2 nur der Standardwert von 0,1 V verwendet. Die Ergebnisse lassen sich in folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Die Werte der Leistung an der Elektronischen Last variieren leicht, wenn die VON-Funktion der Elektronischen Last eingeschaltet ist, die Abweichung liegt aber größtenteils unter 0,02 W; eine Variation der VON-Spannung hat keinen Einfluss.
- Der bevorzugte Modus des *Power Supply*s (*Constant Current* oder *Constant Voltage*) hat keinen Einfluss auf den tatsächlichen Modus im Betrieb oder auf die Messwerte.
- Ist der Grenzwert für den Strom am *Power Supply* mindestens 0,5 A über dem Sollwert der Elektronischen Last, stellen sich für den Strom verlässlich der Sollwert und für die Spannung der Maximalwert des *Power Supply*s ein; die Geräte laufen im Normalbetrieb.
- Der Spannungsverlust im Normalbetrieb hängt von der Stromstärke ab, variiert aber auch von einer Messung zur anderen. Er beträgt in der ersten Messung im Mittel 0,42 V und in der zweiten 0,29 V.
- Entspricht der Grenzwert für den Strom am *Power Supply* genau dem Sollwert der Elektronischen Last, stellt sich dieser ebenfalls für den Strom ein; die Spannung variiert stark.
  - Wird das *Power Supply* vor der Elektronischen Last eingeschaltet, stellt sich für die Spannung wie im Normalbetrieb der Grenzwert des *Power Supply*s ein, der Spannungsverlust ist wie zuvor.

- Wird das *Power Supply* nach der Elektronischen Last eingeschaltet, stellt sich für die Spannung ein niedrigerer Wert ein, in den Messungen zwischen 4,3 V und 8,4 V (Grenzwert: 10 V). Der Spannungsverlust ist deutlich höher als zuvor, er beträgt zwischen 1,6 V und 2,6 V. Die Leistung ergibt sich aus Strom und Spannung an der Elektronischen Last und ist damit deutlich geringer als zuvor.
- Ist der Grenzwert für den Strom am *Power Supply* kleiner als der Sollwert der Elektronischen Last, tritt ein Fehlbetrieb auf. Für den Strom stellt sich der Grenzwert des *Power Supply* ein, die Spannung ist deutlich kleiner als 1 V; bei ausgeschalteter VON-Funktion ist sie etwas höher, als wenn diese eingeschaltet ist, der Spannungsverlust ist gleich. Die Leistung an der Elektronischen Last ergibt sich aus Strom und Spannung und ist daher ebenfalls nahezu null.

**Fazit:** Wird die Elektronische Last im Modus *Constant Current* betrieben, sollte der Grenzwert für den Strom am *Power Supply* mindestens ein Ampere über dem Sollwert liegen. Für die erreichbare Leistung an der Elektronischen Last muss beachtet werden, dass diese sich aus dem Sollwert und der maximalen Spannung am *Power Supply* abzüglich der Spannungsverluste ergibt.

## 5.2.2 Constant Voltage-Messreihen

In den Messreihen CV\_1 und CV\_2 befindet sich die Elektronische Last im Modus CV. In diesem Modus hat die VON-Funktion keinen Einfluss, daher werden nur die Tests null bis drei verwendet. Die Ergebnisse der Messreihe CV\_1 zeigen, dass auch die anderen untersuchten Einflussfaktoren keine Auswirkung haben; in der Messreihe CV\_2 wird daher nur der Test null durchgeführt. Damit soll das Verhalten für Spannungsgrenzwerte untersucht werden, die nur leicht über dem Sollwert liegen. Die verwendeten Soll- und Grenzwerte sind ebenfalls in **Tabelle 16** enthalten. Aus den Messergebnissen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Der bevorzugte Modus am *Power Supply* (*Constant Current* oder *Constant Voltage*) hat keinen Einfluss auf das Ergebnis.
- Die Reihenfolge, in der *Input* und *Output* der Geräte eingeschaltet werden, hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse.
- Ist der Grenzwert für die Spannung am *Power Supply* deutlich höher als der Sollwert, findet ein Normalbetrieb statt; die Spannung am *Power Supply* stellt sich so ein, dass sie um den Spannungsverlust höher ist als der Sollwert. Der Spannungsverlust ist abhängig vom Strom, welcher dem Grenzwert am *Power Supply* entspricht. In den durchgeführten Messungen beträgt der Spannungsverlust etwa 0,21 V.
- Ist der Grenzwert für die Spannung am *Power Supply* niedriger als der Sollwert der Elektronischen Last, findet ein Fehlbetrieb statt; die Spannung an der Last entspricht dem Grenzwert, der Strom ist null Ampere und somit beträgt auch die Leistung null Watt.
- Wenn der Grenzwert für die Spannung am *Power Supply* zwar größer als der Sollwert, aber kleiner als die erforderliche Spannung ist, die sich aus Sollwert und Spannungsverlust ergibt, stellt sich am *Power Supply* die maximale Spannung ein. Durch die Elektronische Last wird der Strom so geregelt, dass die Spannung an der Last dem Sollwert

entspricht, folglich also der Spannungsverlust die Differenz zwischen Soll- und Grenzwert nicht übersteigt. Da diese Differenz nahezu null ist, gilt das auch für den Strom. Die Leistung an der Last ergibt sich aus Strom und Spannung und ist damit ebenfalls sehr gering.

**Fazit:** Wird die Elektronische Last im Modus *Constant Voltage* verwendet, sollte für einen Normalbetrieb der Grenzwert für die Spannung am *Power Supply* je nach Spannungsverlust ausreichend höher sein als der Sollwert. Die Leistung an der Last lässt sich über den Sollwert (Spannung) und den Grenzwert am *Power Supply* (Strom) einstellen.

### 5.2.3 Constant Power-Messungen

Die Messreihen im Modus *Constant Power* werden in zwei Varianten unterteilt. In der ersten Variante (CW 1\_1 und CW 1\_2) ist der Grenzwert für den Strom am *Power Supply* konstant, der Grenzwert für die Spannung wird innerhalb eines Tests variiert; die genauen Werte sind der **Tabelle 16** zu entnehmen. Die Tests vier bis sieben werden mit den VON-Spannungen 0,1 V, 0,5 V, 1 V, 1,5 V, 2 V, 2,5 V und 3 V durchgeführt. In der zweiten Variante der Messreihe (CW 2\_1 und CW 2\_2) bleibt der Grenzwert für die Spannung konstant und der für den Strom wird variiert. Die Tests vier bis sieben werden in der zweiten Variante mit den VON-Spannungen 0,1 V, 1 V und 3 V durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse lässt sich in folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Der bevorzugte Modus am *Power Supply* hat keinen Einfluss auf den tatsächlichen Betriebsmodus oder die Ergebnisse.
- Wenn die Grenzwerte am *Power Supply* so hoch gewählt werden, dass die maximale Leistung deutlich (mehrere Watt) über dem Sollwert liegt, befindet sich das *Power Supply* zuverlässig im Modus *Constant Voltage*; für die Spannung stellt sich der maximale Wert ein, der Strom wird von der Elektronischen Last so geregelt, dass die Leistung dem Sollwert entspricht. Das ist der Normalbetrieb (→ **Abbildung 35a**).
- Je höher die am *Power Supply* mögliche Leistung über dem Sollwert der Elektronischen Last liegt, desto stabiler ist der Normalbetrieb.
- Bei einem Fehlbetrieb befindet sich das *Power Supply* im Modus *Constant Current*, der Strom entspricht also dem Grenzwert am *Power Supply*. Die Spannung ist kleiner als ein Volt und entsprechend auch die Leistung an der Elektronischen Last. Es kommt bei verschiedenen Einstellungen zu diesem Fehlbetrieb.
  - Ist die VON-Funktion eingeschaltet und sind die Grenzwerte des *Power Supplys* so gewählt, dass die geforderte Leistung nicht geliefert werden kann, tritt immer ein Fehlbetrieb auf (→ **Abbildung 35b**; kleinster Spannungswert).
  - Kann die geforderte Leistung vom *Power Supply* geliefert werden, tritt ein Fehlbetrieb deutlich häufiger auf, wenn die Elektronische Last vor dem *Power Supply* eingeschaltet wird und zusätzlich die VON-Funktion aktiviert ist (→ **Abbildung 35c**). Bei höheren VON-Spannungen (>1,5 V) wird zuverlässig ein Normalbetrieb erreicht.

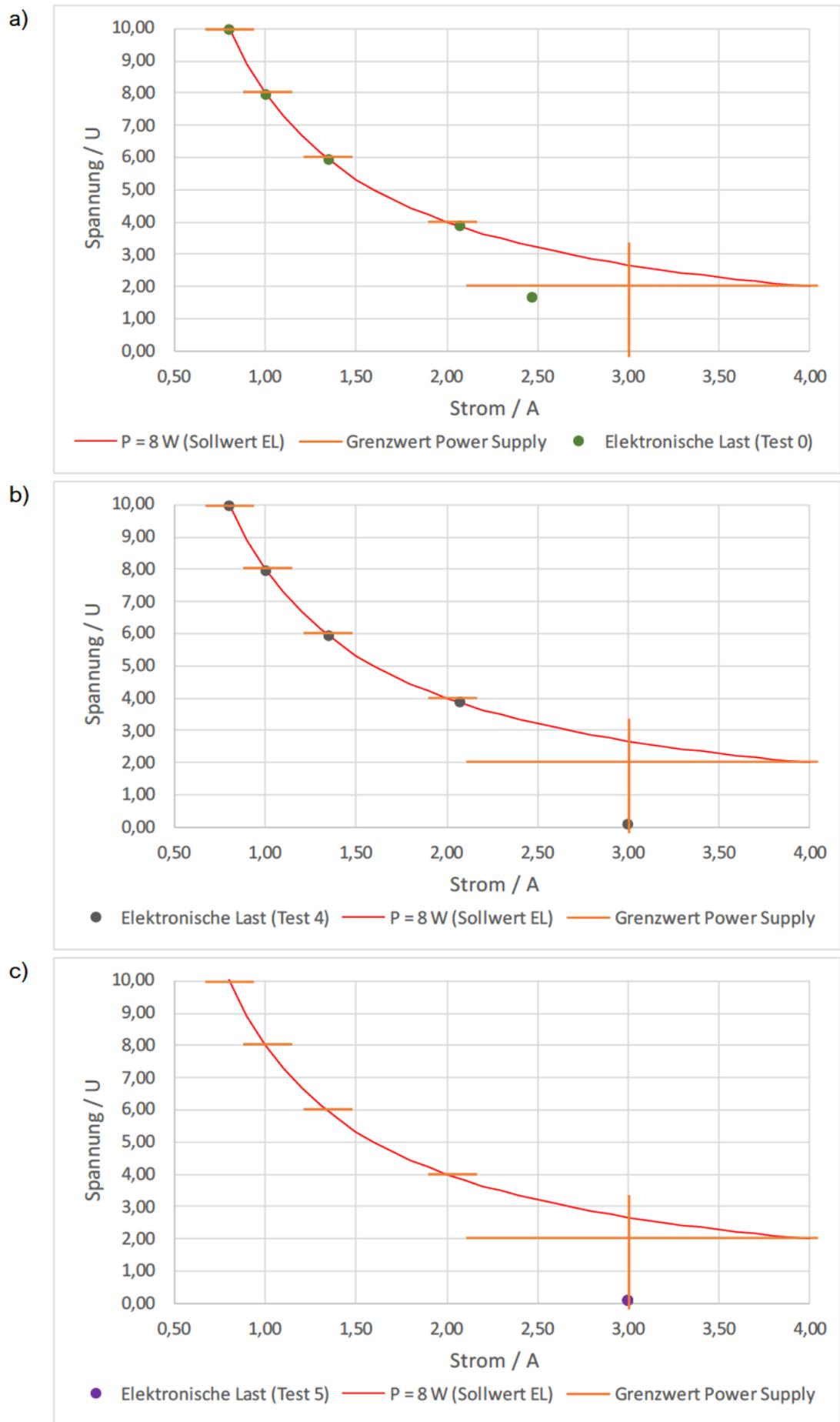


Abbildung 35: Ergebnisse aus den CW-Messreihen (Variante 1)

**Fazit:** Befindet sich die Elektronische Last im Modus *Constant Power*, sollte für einen Normalbetrieb die VON-Funktion der Elektronischen Last eingeschaltet werden und eine VON-Spannung größer als 1,5 V gewählt werden. Außerdem sollte stets der *Output* am *Power Supply* mit einer kleinen Verzögerung vor dem *Input* der Last eingeschaltet werden. Hohe Grenzwerte am *Power Supply* (hohe Leistung gegenüber dem Sollwert) senken die Wahrscheinlichkeit eines Fehlbetriebs.

#### 5.2.4 Constant Resistance-Messungen

Die Messreihen im Modus *Constant Resistance* werden ebenfalls in zwei Varianten durchgeführt. In der ersten Variante (CR 1) ist wieder der Grenzwert für den Strom am *Power Supply* konstant und der Grenzwert für die Spannung variabel, in der zweiten Variante (CR 2\_1 und CR 2\_2) umgekehrt (→ **Tabelle 16**). Die Tests vier bis sieben werden in der Messreihe CR 1 mit den VON-Spannungen 0,1 V und 1 V durchgeführt, für die Messreihe CR 2\_2 werden zusätzlich noch Messungen mit der VON-Spannung 3 V durchgeführt. Für die Messreihe CR 2\_2 wird nur der Standardwert von 0,1 V verwendet. Die Auswertung lässt sich in folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Die VON-Funktion hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse.
- Der bevorzugte Modus am *Power Supply* hat keinen Einfluss.
- Die Reihenfolge, in der *Input* und *Output* eingeschaltet werden, hat keinen Einfluss.
- Das *Power Supply* befindet sich immer im Modus *Constant Voltage*, die Spannung entspricht also dem Grenzwert; der Strom ergibt sich aus der Spannung an der Elektronischen Last und ihrem Sollwert nach Gleichung 3.
- Ist der Grenzwert für den Strom am *Power Supply* kleiner als der nach genannter Formel notwendige, entspricht er dem Grenzwert; die Spannung ist entsprechend geringer, sodass der Sollwert für den Widerstand an der Elektronischen Last erfüllt ist. Die Leistung ergibt sich aus Strom und Spannung an der Last.

**Fazit:** Im Modus Constant Resistance gibt es keine Betriebshinweise zu beachten.

## 5.3 Experiment 2: Langzeitversuche

Im zweiten Experiment wird die korrekte Funktion der Steuerprogramme über einen längeren Zeitraum geprüft. Die Messungen werden mit Hilfe des Programms `langzeit_exp.vi` durchgeführt, in **Abbildung 36** ist das Ablaufdiagramm dargestellt. Das Programm stellt über eine festgelegte Zeit immer neue Sollwerte an der Elektronischen Last ein, nimmt die Messwerte auf und schreibt diese anschließend in ein Excel-Dokument. Geprüft werden soll vorrangig, ob bei häufigen Ansprachen Fehler auftreten; dafür wird regelmäßig die Fehlerliste beider Geräte abgefragt. Der Versuch wird einmal für fünf Minuten und einmal für 30 min durchgeführt. Die Elektronische Last befindet sich bei diesem Experiment im Modus *Constant Power* und für jede Messung wird ein willkürlicher Wert zwischen 10 und 20 W als Sollwert eingestellt.

### Auswertung

Bei beiden Durchläufen sind die Fehler-Arrays am Ende der Messung leer, es treten also keine Fehler in den Geräten auf. In **Tabelle 17** ist ein Auszug mit zehn Werten aus den Messwerten dargestellt. In der rechten Spalte („Differenz P (EL)“) wird die Differenz aus eingestelltem Sollwert und ausgelesenem Messwert an der Elektronischen Last ermittelt. Der tatsächliche Wert für die Leistung ist in den durchgeführten Messungen maximal 0,031 W kleiner als der Sollwert, im Mittel beträgt die Abweichung 0,011 W.

Sollwert EL	Messwerte						Differenz P (EL) [W]
	Power Supply			Elektronische Last			
P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	[W]
10,000	1,263	8,000	10,104	1,263	7,912	9,989	0,011
17,900	2,281	8,000	18,250	2,282	7,840	17,889	0,011
17,732	2,259	8,000	18,072	2,260	7,842	17,720	0,012
14,146	1,795	8,000	14,363	1,795	7,875	14,136	0,010
14,047	1,782	8,000	14,258	1,782	7,876	14,036	0,011
18,552	2,364	8,000	18,913	2,364	7,834	18,521	0,031
13,102	1,661	8,000	13,286	1,660	7,884	13,089	0,013
17,033	2,169	8,000	17,351	2,169	7,849	17,024	0,009
11,864	1,502	8,000	12,011	1,502	7,896	11,855	0,009
12,623	1,599	8,000	12,790	1,599	7,888	12,611	0,012

Tabelle 17: Ausschnitt der Messwerte des Langzeitversuchs

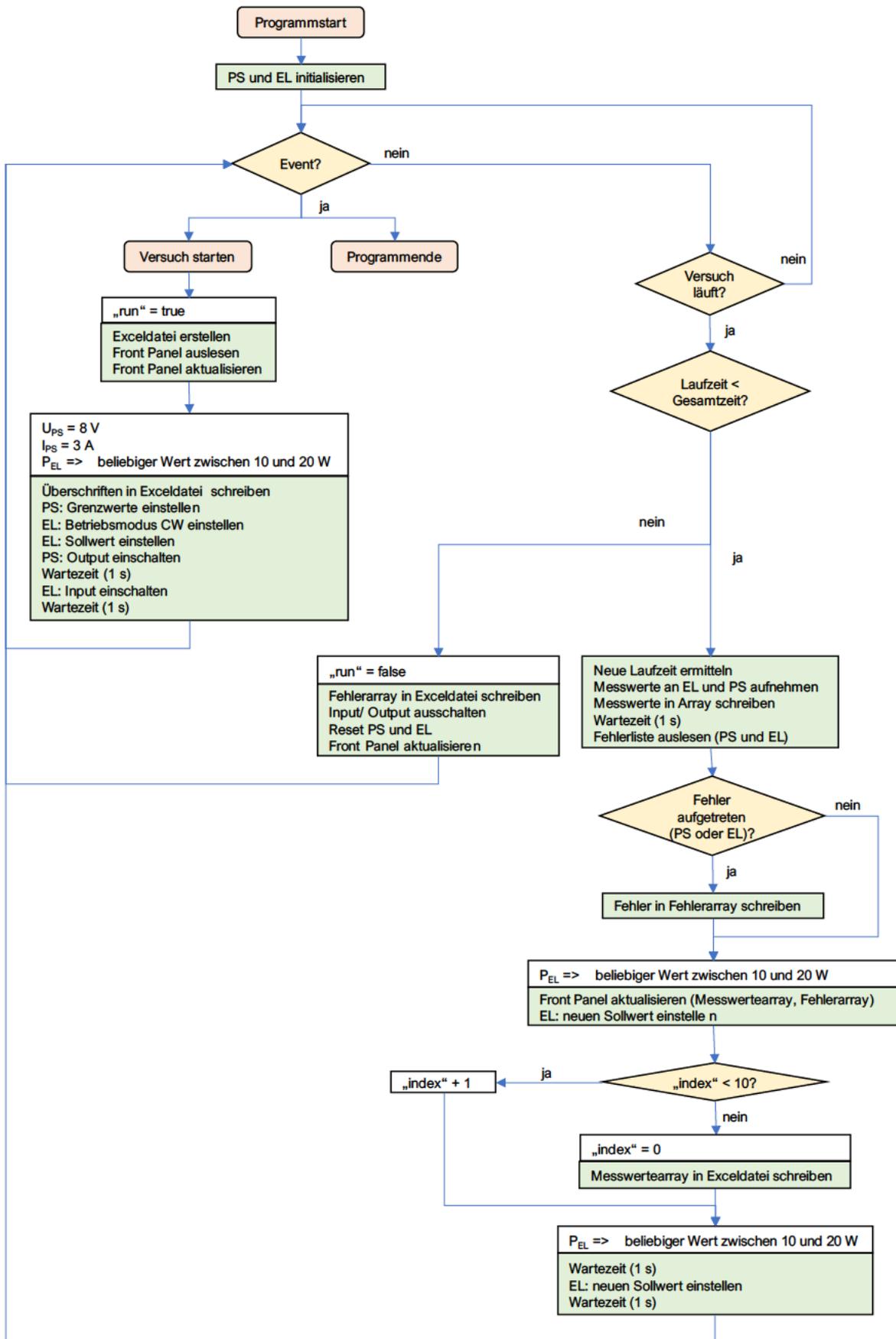


Abbildung 36: Ablaufdiagramm des Programms *langzeit\_exp.vi* (Langzeitversuch)

## 5.4 Experiment 3: Funktionsdauertests

Im dritten Experiment wird die Geschwindigkeit von der Schnittstelle und den Geräten untersucht. In dem Programm `Funktionsdauer_test.vi` wird die Dauer der Basisfunktionen von *Power Supply* und Elektronischer Last gemessen; **Abbildung 37** zeigt das *Block Diagram* des Programms für das *Power Supply*. Als Basisfunktionen werden solche ausgewählt, die nahezu bei jeder Verwendung der Geräte gebraucht werden. Für die Messungen wird die Wartezeit von fünf Millisekunden aus den *SubVIs* `set_cmds.vi` und `set_and_get.vi` entfernt und jede der Funktionen wird dreimal gemessen.

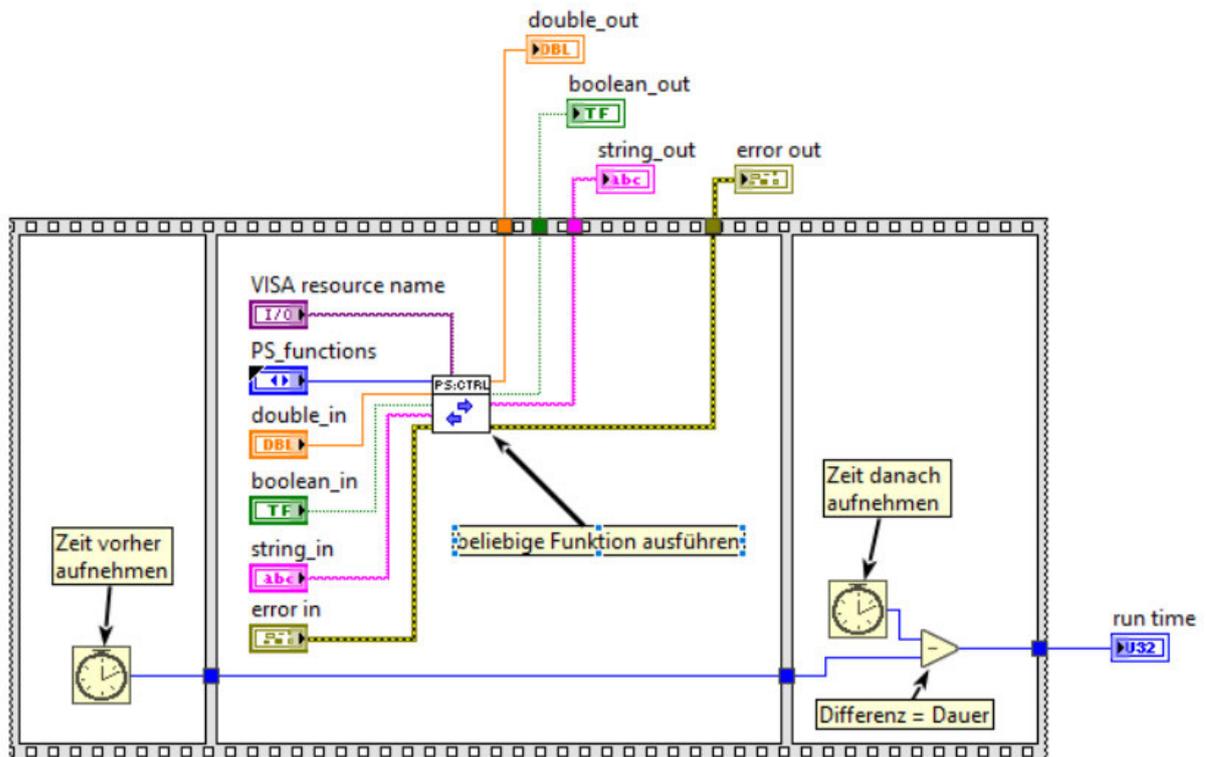


Abbildung 37: Block Diagram des Programms `Funktionsdauer_test_PS.vi`

### Auswertung

In **Tabelle 18** sind die Messwerte für das *Power Supply* dargestellt. Auffällig ist, dass alle Funktionen, in denen nur ein Befehl an das Gerät gesendet wird, nahezu keine Verzögerung haben. Die Funktion „init ()“ dauert mindestens fünf Millisekunden, die Funktion „close ()“ maximal eine. Da in beiden Funktionen fast die gleichen Befehle an das *Power Supply* gesendet werden, muss das Öffnen einer Gerätesitzung in der Funktion „init ()“ die Verzögerung bewirken. Die „read“-Funktionen haben eine Verzögerung von einigen Millisekunden. Das kann daran liegen, dass zwei *VISA*-Funktionen ausgeführt werden müssen, um zusätzlich den Ausgangsspeicher auszulesen. Besonders auffällig ist die Dauer der Messfunktionen. Hier wird im Gerät eine Messung durchgeführt und das Ergebnis ausgelesen. Das dauert deutlich länger als andere Werte auszulesen und die Dauer variiert auch deutlicher zwischen den einzelnen Messungen.

<b>Basisfunktionen des Power Supplys</b>	<b>Zeit 1 [ms]</b>	<b>Zeit 2 [ms]</b>	<b>Zeit 3 [ms]</b>
init	5	5	7
close	0	0	1
set Output State (einschalten)	0	0	0
set Output State (ausschalten)	1	0	1
set Remote	0	0	1
set Remote with Lock	0	1	1
set Local	0	0	0
set Current	0	1	0
set Voltage	0	1	0
read Measure Current	139	146	153
read Measure Voltage	90	77	96
read error	2	2	3
read IDN	3	3	4

*Tabelle 18: Messwerte aus den Funktionsdauertests des Power Supplys*

Bei der Elektronischen Last (→ **Tabelle 19**) ist zu beobachten, dass die meisten Funktionen nur eine Dauer von null oder einer Millisekunde haben. Die Funktion „init ()“ bewirkt ebenfalls eine Verzögerung von fünf Millisekunden, die Funktion „close ()“ dagegen keine. In einzelnen Messungen hat das Einstellen der Sollwerte für Strom, Leistung und Widerstand eine etwas längere Dauer von bis zu vier Millisekunden. Auch bei der Last dauern die „read“-Funktionen länger; zwischen drei und acht Millisekunden. Bis auf einen Ausreißer (27 ms) ist aber kein Unterschied von den Messfunktionen zu den übrigen „read“-Funktionen zu erkennen.

<b>Basisfunktionen der Elektronischen Last</b>	<b>Zeit 1 [ms]</b>	<b>Zeit 2 [ms]</b>	<b>Zeit 3 [ms]</b>
init	0	5	5
close	0	0	0
set Input State (einschalten)	0	1	1
set Input State (ausschalten)	0	0	0
set CC	0	0	0
set CV	0	0	0
set CW	0	0	0
set CR	0	1	0
set Remote	1	1	0
set Remote with Lock	1	1	0
set Local	1	0	1
set Current	2	0	0
set Voltage	0	0	1
set Power	4	0	1
set Resistance	3	1	1
read Measure Current	4	3	3
read Measure Voltage	3	27	3
read error	7	8	7
read IDN	5	6	5

*Tabelle 19: Messwerte aus den Funktionsdauertests der Elektronischen Last*

## 5.5 Experiment 4: Wartezeitmessungen

Im vierten Experiment wird untersucht, bei welcher Mindestwartezeit zwischen verschiedenen Funktionen ein Normalbetrieb garantiert werden kann. Für das Experiment wird das *Power Supply* immer vor der Last eingeschaltet und die VON-Funktion an der Elektronischen Last ist eingeschaltet mit einem Spannungswert von 0,1 V. Es wird ständig zwischen zwei Wertetriplets gewechselt (→ **Tabelle 20**). Das Experiment wird mit Hilfe von Programmen in zwei Varianten für jeden der vier Betriebsmodi an der Elektronischen Last durchgeführt. In **Abbildung 38** ist das Ablaufdiagramm des Programms `wartezeit_CC.vi` dargestellt. In Variante eins wird der Ablauf genau wie im Diagramm verwendet; es wird untersucht, wie groß die Verzögerung zwischen Einschalten der Elektronischen Last und Aufnahme der Messwerte für stabile Werte sein muss. In Variante zwei werden die beiden markierten Aktionen vertauscht; damit wird untersucht, ob es auch zwischen dem Einschalten von *Power Supply* und Elektronischer Last eine Verzögerung braucht, um einen Normalbetrieb zu garantieren. Die variable Wartezeit ist hier der Untersuchungswert; sie wird zu Beginn vorgegeben und dann immer nach vier Messungen mit jedem Wertetriplet um einen festen Betrag reduziert. Für die erste Messung beträgt diese Startwartezeit 1000 ms und die Schrittweite 100 ms, weitere Messungen werden mit kleineren Abstufungen im interessanten Bereich durchgeführt. Die Messungen werden in jedem Betriebsmodus der Elektronischen Last durchgeführt.

Betriebsmodus der Elektronischen Last		Grenzwerte (PS)		Sollwert (EL)
		[A]	[V]	[W]
<i>Constant Current</i>	Wertetriplet 1	5	8	3 A
	Wertetriplet 2	4	7	2 A
<i>Constant Voltage</i>	Wertetriplet 1	4	7	6 V
	Wertetriplet 2	3	6	5 V
<i>Constant Power</i>	Wertetriplet 1	4	7	12 W
	Wertetriplet 2	3	6	10 W
<i>Constant Resistance</i>	Wertetriplet 1	5	12	6 Ohm
	Wertetriplet 2	3	10	5 Ohm

Tabelle 20: Wertetriplets für die Wartezeitmessungen

### Auswertung

Die Messergebnisse befinden sich in **Tabelle C - 7** und **Tabelle C - 8** in **Anhang C**. In der Auswertung sind die zwei Varianten getrennt zu betrachten. Die Ergebnisse aus Variante eins sind gleich für alle Betriebsmodi der Elektronischen Last; in **Abbildung 39** sind beispielhaft die Werte aus den Messungen im Modus CC dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass es bei einer Verzögerung unter 600 ms zu ersten Abweichungen kommt.

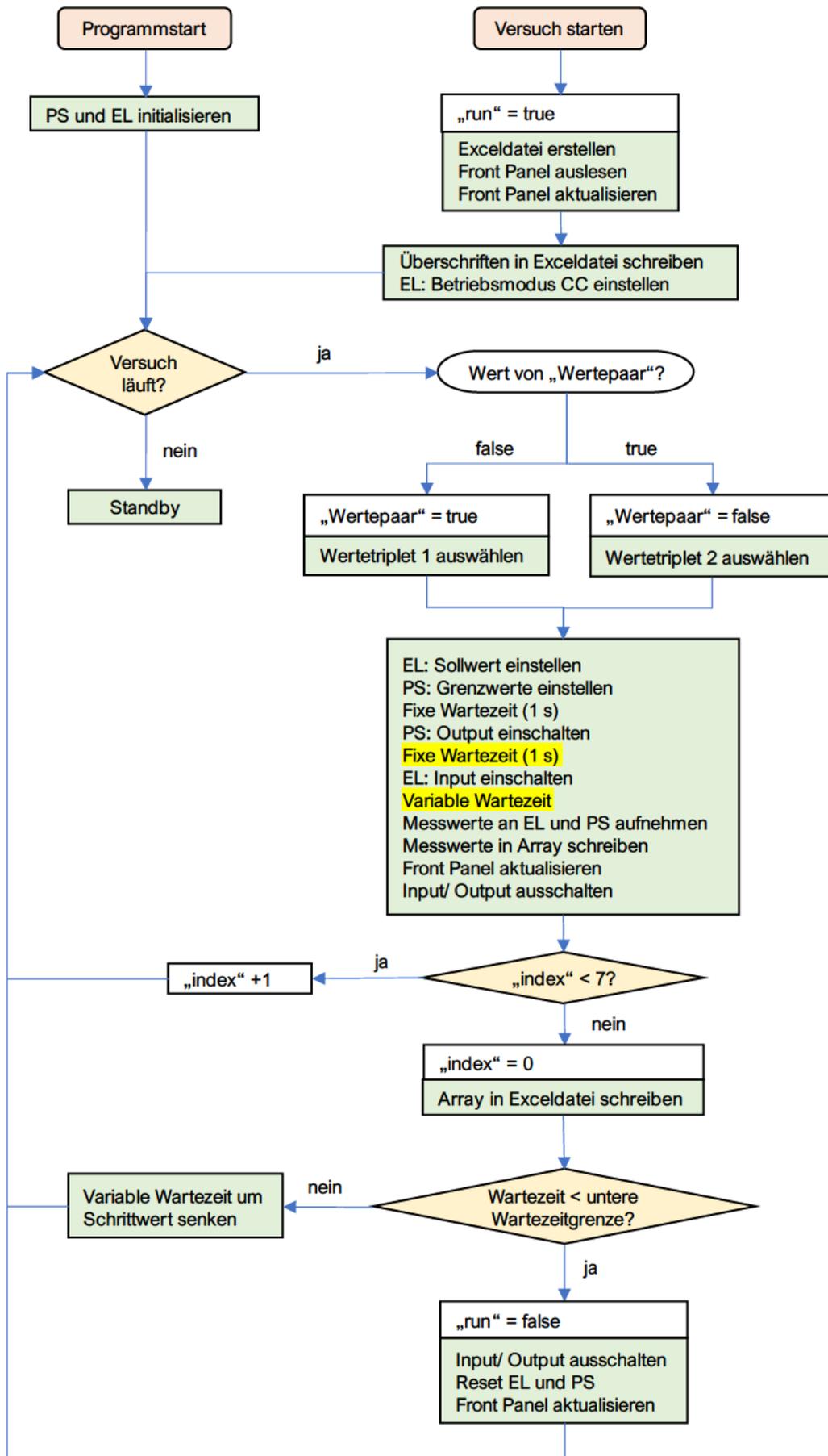


Abbildung 38: Ablaufdiagramm des Programms *wartezeit\_CC.vi* (Wartezeitmessung)

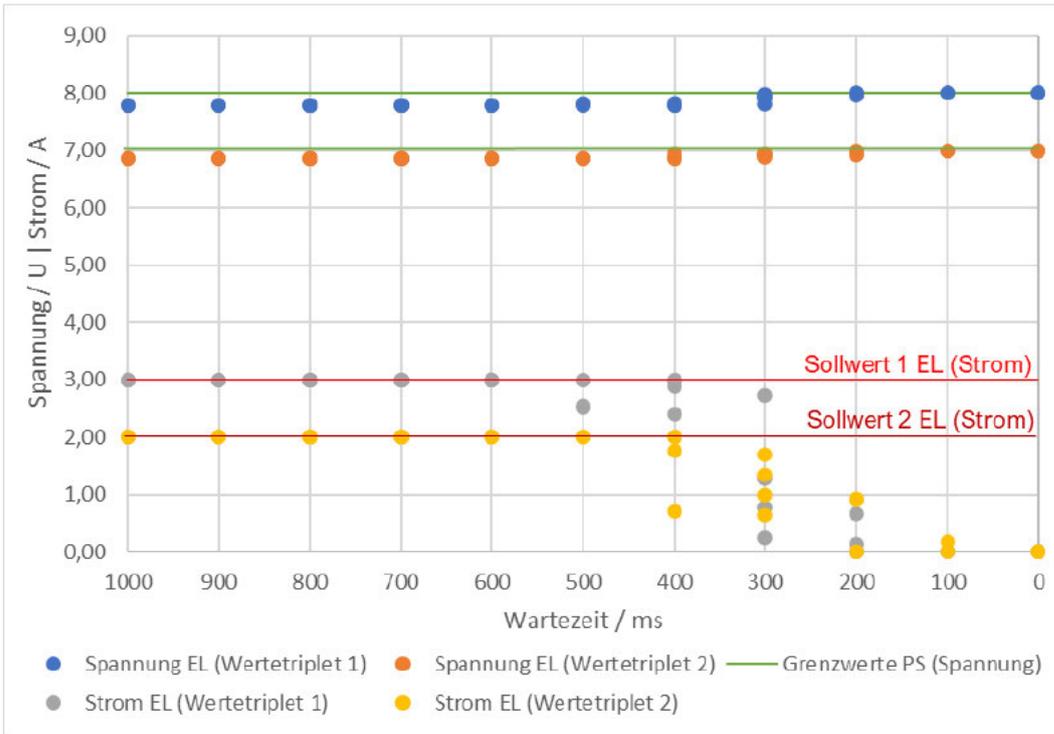


Abbildung 39: Werte aus der Wartezeitmessung (Variante 1, Modus CC)

Aus den Messwerten der zweiten Variante wird deutlich, dass es für die Betriebsmodi CC, CV und CR keine Verzögerung zwischen dem Einschalten der beiden Geräte braucht. Selbst bei einer Verzögerungszeit von 0 ms gibt es keine Abweichungen. Im Modus CW sehen die Ergebnisse etwas anders aus, hier ist eine Verzögerung von mindestens 30 ms notwendig, um sinnvolle Messwerte zu erhalten (→ **Abbildung 40**).

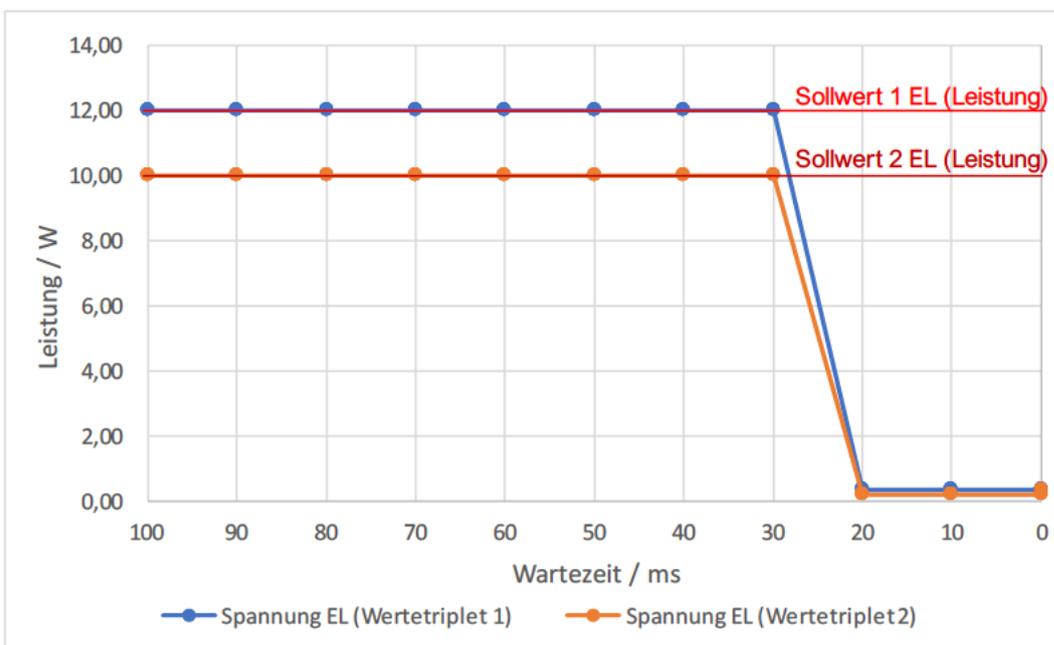


Abbildung 40: Werte aus der Wartezeitmessung (Variante 2, Modus CW)

## 5.6 Betriebshinweise

Aus den durchgeführten und zuvor beschriebenen Messreihen lassen sich einige Erkenntnisse zur Funktionsweise und daraus Nutzungshinweise für die Geräte *Power Supply* und Elektronische Last ableiten. Die Einhaltung der Nutzungshinweise soll einen sicheren und sinnvollen Betrieb gewährleisten, wenn beide Geräte gemeinsam als Spannungsquelle und Verbraucher verwendet werden. Sie machen Vorgaben zu den Wertebereichen, Wartezeit und Reihenfolge der Aktivierung beider Geräte. Da die Empfehlungen vom Modus der Elektronischen Last abhängen, sind sie danach sortiert.

1. Modus *Constant Current* an der Elektronischen Last
  - a. Der Grenzwert für den Strom am *Power Supply* sollte mindestens um 1 A höher sein als der Sollwert der Elektronischen Last.
  - b. Die an der Last messbare Leistung ergibt sich aus dem Sollwert (Strom) und dem Spannungsgrenzwert am *Power Supply* abzüglich der Spannungsverluste.
2. Modus *Constant Voltage* an der Elektronischen Last
  - a. Der Grenzwert für die Spannung am *Power Supply* sollte je nach Spannungsverlust ausreichend höher sein als der Sollwert an der Elektronischen Last; für die in den Messungen verwendeten Werte sind 0,5 V ausreichend.
  - b. Die an der Elektronischen Last messbare Leistung ergibt sich aus dem Sollwert und dem Grenzwert für Strom am *Power Supply*.
3. Modus *Constant Power* an der Elektronischen Last
  - a. Die VON-Funktion sollte eingeschaltet sein und ein Wert für die VON-Spannung über 1,5 V gewählt werden.
  - b. Das *Power Supply* muss vor der Elektronischen Last eingeschaltet werden.
  - c. Zwischen dem Einschalten der Geräte muss eine Wartezeit von mindestens 30 ms liegen.
  - d. Die Grenzwerte am *Power Supply* sollten so gewählt werden, dass die lieferbare Leistung deutlich über dem Sollwert der Elektronischen Last liegt.
4. Modus *Constant Resistance* an der Elektronischen Last
  - a. Es gibt nichts zu beachten in diesem Modus.
  - b. Bei ausreichend hohem Grenzwert für den Strom am *Power Supply* lässt sich die an der Elektronischen Last messbare Leistung mit  $P = \frac{U_{PS}^2}{R_{EL}}$  berechnen.
5. Zwischen dem Einschalten des zweiten Geräts und der Messung aktueller Werte muss mindestens eine Wartezeit von 600 ms liegen.

Bis auf die Hinweise zur Wartezeit sind alle Empfehlungen aus dem Experiment „Kombi-Betrieb“ abgeleitet. Zu beachten ist, dass dabei jeweils eine Wartezeit von 1 s zwischen dem Einschalten der beiden Geräte und der Aufnahme der Messwerte eingefügt wurde. Die Hinweise gelten also für die Modi *Constant Current*, *Constant Voltage* und *Constant Resistance* nur unter diesen Bedingungen. Im Modus *Constant Power* gelten die angegebenen Hinweise unter Einhaltung der Wartezeitempfehlungen.

Die Wartezeit zwischen zwei Aufrufen mit dem Eingang „wait time“ an den Steuerprogrammen funktioniert nur, wenn es sich um Aufrufe desselben Geräts handelt. Andernfalls muss eine gewünschte Wartezeit in das übergeordnete Programm integriert werden.

## 6 Zusammenfassung/ Fazit

Ziel der Arbeit war es, im Rahmen eines Hybridversuchsstandes geeignete Schnittstellenprogramme für die Geräte von Keysight (*Power Supply*) und Itech (Elektronische Last) in LabVIEW zu entwickeln und auf die Funktionen zu prüfen. Um die Datenkonsistenz zu gewährleisten, wurde für beide Geräte das Prinzip einer funktionalen globalen Variable verwendet. Die Programme können als *SubVI* in ein übergeordnetes Programm eingebunden werden. Zur Verwendung ist dazu abgesehen von den Ein- und Ausgangselementen kein weiterer Code notwendig. Die Programme können in dem Hybridversuchsstand oder jeder anderen Anwendung mit einem oder beiden Geräten eingesetzt werden. Werden die beiden Geräte zusammen als Spannungsquelle und Verbraucher eingesetzt, müssen einige Betriebshinweise beachtet werden, die eine korrekte Funktion gewährleisten. Wichtig ist, dass die Grenzwerte am *Power Supply* (Spannungsquelle) höher gewählt werden als der Sollwert an der Elektronischen Last (Verbraucher). Wie genau sich Strom und Spannung am *Power Supply* verhalten hängt von dem angeschlossenen Verbraucher ab; handelt es sich dabei um die Elektronische Last, kann über den Betriebsmodus gewählt werden, welche Größe konstant gehalten wird. Werden beide Geräte zusammen verwendet, ist besonders im Modus mit konstanter Leistung wichtig, dass der *Input* der Elektronischen Last vor dem *Output* des *Power Supply*s eingeschaltet wird. Aus Messversuchen ergibt sich, dass die Geräte eine gewisse Einschwingzeit haben und daher eine Mindestzeit zwischen Einschalten der Geräte und Aufnahme der Messwerte eingehalten werden muss.

Für die durchgeführten Versuche wurden die beiden Geräte gemeinsam betrieben, jedoch ohne den Energiespeicher, der außerdem noch Teil des Hybridversuchsstandes sein wird. Es kann daher nicht mit Gewissheit gesagt werden, dass die Ergebnisse auf einen Betrieb mit Energiespeicher übertragbar sind oder welchen sonstigen Einfluss ein Energiespeicher auf das Verhalten beider Geräte hat.

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] ITECH Electronic: *Programmable DC Electronic Load – Series IT8800 User’s Manual*, 2022
- [2] ITECH Electronic: *Programmable DC Electronic Load – Series IT8800 Programming Guide*, 2018
- [3] Keysight Technologies: „Status-Tutorial“,  
<[https://rfmw.em.keysight.com/spdhelpfiles/aps/webhelp/DE/Content/\\_H\\_SCPI%20Programming%20Reference/40%20-%20Status\\_Tutorial.htm](https://rfmw.em.keysight.com/spdhelpfiles/aps/webhelp/DE/Content/_H_SCPI%20Programming%20Reference/40%20-%20Status_Tutorial.htm)>  
(11. Mai 2023)
- [4] Keysight Technologies: *Keysight E36200 Series Programming Guide – E36200 Series Autoranging DC Power Supplies*, Malaysia, 2020
- [5] Keysight Technologies: *Keysight E36200 Series User’s Guide – E36200 Series Autoranging DC Power Supplies*, Malaysia, 2020
- [6] Mütterlein, Bernward: *Handbuch für die Programmierung mit LabVIEW*, Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlage), 2005
- [7] National Instruments: Context Help „VISA VIs and Functions“, (11. Mai 2023)
- [8] National Instruments: „Ereignisstruktur“,  
<[https://www.ni.com/docs/de-DE/bundle/labview/page/glang/event\\_structure.html](https://www.ni.com/docs/de-DE/bundle/labview/page/glang/event_structure.html)>  
(17. Juni 2023)
- [9] National Instruments: „Vorschläge für die Verwendung von Ausführungssystemen und Prioritäten“,  
<[https://www.ni.com/docs/de-DE/bundle/labview/page/lvconcepts/suggestions\\_for\\_exec.html#functional\\_global\\_variables](https://www.ni.com/docs/de-DE/bundle/labview/page/lvconcepts/suggestions_for_exec.html#functional_global_variables)> (28. Juni 2023)

## A Anhang

Bezeichnung	Einheit	DEF = RESET	MIN	MAX
Output State		OFF		
OCP State		OFF		
OVP State		ON		
Voltage Slew Rise/ Fall Max		ON		
Preferred Mode		VOLT		
Sense Mode		INT		
set Current (Grenzwert)	A	2	0	20,6
set Current Step	A	0,0012311	-	-
set Voltage (Grenzwert)	V	0	0	30,9
set Voltage Step	V	0,00195327	-	-
Output Delay Fall	s	0	0	3600
Output Delay Rise	s	0	0	3600
Over Current Protection Limit	A	22	0	22
Over Current Protection Delay	s	0,05	0	3600
Over Voltage Protection Limit	V	33	0	33
Voltage Slewrate Rise	V/s	9,9*10 <sup>37</sup>	0,0015	9,9*10 <sup>37</sup>
Voltage Slewrate Fall	V/s	9,9*10 <sup>37</sup>	0,0015	9,9*10 <sup>37</sup>

Tabelle A - 1: Standardeinstellungen, MIN und MAX am Power Supply

Bezeichnung	Einheit	DEF = RESET	MIN	MAX
Input State		OFF		
Input Delay State		OFF		
Short-circuit function		OFF		
Software OCP State		OFF		
Voltage Latch (VON-Funktion)		ON		
Function (Betriebsmodus)		CURR		
set Current	A	0	0	60
set Voltage	V	120	0,1	120
set Power	W	0	0	250
set Resistance	Ohm	7500	0,05	7500
Input Delay	s	10	0,01	60000
Over-Current Protection Limit	A	60	0	60
Over-Current Protection Delay	s	3	0	60
Software Over-Power Protection Limit	W	260	0	260
Over-Power Protection Delay	s	3	0	60
Hardware Over-Power Level	W	250	0	260
Current Slewrate Both	A/ms	0	0	0
Current Slewrate positive	A/ms	5	0,001	5
Current Slewrate negative	A/ms	5	0,001	5
high Voltage CC-Mode	V	130	0	130
low Voltage CC-Mode	V	0	0	130
high Current CV-Mode	A	66	0	66
low Current CV-Mode	A	0	0	66
high Voltage CW-Mode	V	130	0	130
low Voltage CW-Mode	V	0	0	130
high Voltage CR-Mode	V	130	0	130
low Voltage CR-Mode	V	0	0	130
Voltage ON (VON-Spannung)	V	0,1	0	120

Tabelle A - 2: Standardeinstellungen, MIN und MAX an der Elektronischen Last

Erste Case-Struktur	Zweite Case-Struktur	Beschreibung	Verweis
"initialise"	/	Sitzung öffnen; "Starteinstellungen"	Kap. 4.1
"close"	/	"Schlusseinstellungen"; Sitzung schließen	Kap. 4.1
"without parameter"	set CC	konstanter Strom am <i>Input</i>	Kap. 2.2
	set CV	konstante Spannung am <i>Input</i>	Kap. 2.2
	set CW	konstante Leistung am <i>Input</i>	Kap. 2.2
	set CR	konstanter Widerstand am <i>Input</i>	Kap. 2.2
	set Remote	externe Steuerung der EL z.B. über einen PC, alle Tasten gesperrt außer "Local"	Kap. 2.2
	set Remote with Lock	externe Steuerung der EL, komplette Tastensperre	Kap. 2.2
	set Local	lokale (Tasten am Gerät) oder externe Steuerung der EL möglich	Kap. 2.2
	Protection Clear	Aufheben der <i>Input</i> -Sperre nach einer ausgelösten Schutzfunktion	Kap. 2.2
	Reset	Reset: Standardeinstellungen	Kap. 2.2
	Clear Status	Löschen der <i>Event Register</i> aller Registergruppen	Kap. 2.3
	wait to continue	Warten, bis alle vorherigen Befehle ausgeführt sind	
presert EnR	Zurücksetzen aller <i>Enable Register</i> auf Standardeinstellungen	Kap. 2.3	
"set and read string"	read Mode	<i>Constant Status</i> Funktion auslesen (CURR, VOLT, POW, RES)	Kap. 2.2
	read IDN	gibt Geräte-ID zurück	Kap. 2.3
	read Self-test	Selbsttest durchführen und Ergebnis auslesen	Kap. 2.3
	read error	erstes Element des Fehlerspeichers auslesen	Kap. 2.2
	read buffer	<i>Output</i> -Speicher auslesen	Kap. 2.3
	set free command	manueller Befehl	Kap. 2.3

Erste Case-Struktur	Zweite Case-Struktur		Beschreibung	Verweis
	set	read		
"set and read boolean"	set Input State	read Input State	Last ein/aus	Kap. 2.2
	set OCP State	read OCP State	Status Überstromschutz (ein/aus)	Kap. 2.2
	set Input Delay	read Input Delay State	Verzögerung beim Einschalten (ein/aus)	Kap. 2.2
	set short-circuit	read short-circuit State	Kurzschlussfunktion (ein/aus)	Kap. 2.2
	set Current Slew State	read Current Slew State	Status <i>Over Current slow rise</i> Modus	
	set Voltage Latch	read Voltage Latch	Status VON-Funktion (ein/aus)	Kap. 2.2
		read Operation cmplt	Gibt "1" zurück, wenn alle Befehle erledigt sind	
"set and read double"	set Current	read Set Current	Sollwert für Strom im <i>CC</i> -Modus	Kap. 2.2
	set Voltage	read Set Voltage	Sollwert für Spannung im <i>CV</i> -Modus	Kap. 2.2
	set Power	read Set Power	Sollwert für Leistung im <i>CW</i> -Modus	Kap. 2.2
	set Resistance	read Set Resistance	Sollwert für Widerstand im <i>CR</i> -Modus	Kap. 2.2
	set Input Delay	read Input Delay	Verzögerung beim Einschalten	Kap. 2.2
	set OCP Limit	read OCP Limit	Stromgrenze für die Überstromschutzfunktion	Kap. 2.2
	set OCP Delay	read OCP Delay	Verzögerung bei Überschreiten der Grenze der <i>OCP</i>	Kap. 2.2
	set OPP soft Limit	read OPP soft Limit	Leistungsgrenze der <i>Software OPP</i>	Kap. 2.2
	set OPP hard Limit	read OPP hard Limit	Leistungsgrenze der <i>Hardware OPP</i>	Kap. 2.2
	set OPP Delay	read OPP Delay	Verzögerung bei Überschreiten der Grenze der <i>OPP</i>	Kap. 2.2
	set Current Slew	read Current Slew	Änderungsrate des Stroms bei Wertveränderungen (positiv/negativ)	
	set Current Slew Rise	read Current Slew Rise	Änderungsrate des Stroms bei positiven Wertveränderungen	

"set and read double"	set Current Slew Fall	read Current Slew Fall	Änderungsrate des Stroms bei negativen Werteveränderungen	
	set CC-Voltage high	read CC-Voltage high	Spannungsobergrenze im CC-Modus	Kap. 2.2
	set CC-Voltage low	read CC-Voltage low	Spannungsuntergrenze im CC-Modus	Kap. 2.2
	set CV-Current high	read CV-Current high	Stromobergrenze im CV-Modus	Kap. 2.2
	set CV-Current low	read CV-Current low	Stromuntergrenze im CV-Modus	Kap. 2.2
	set CW-Voltage high	read CW-Voltage high	Spannungsobergrenze im CW-Modus	Kap. 2.2
	set CW-Voltage low	read CW-Voltage low	Spannungsuntergrenze im CW-Modus	Kap. 2.2
	set CR-Voltage high	read CR-Voltage high	Spannungsobergrenze im CR-Modus	Kap. 2.2
	set CR-Voltage low	read CR-Voltage low	Spannungsuntergrenze im CR-Modus	Kap. 2.2
	set Voltage ON	read Voltage ON	Spannungswert für die VON-Funktion	Kap. 2.2
	set Standard Event EnR	read Standard Event EnR	<i>Standard Event Enable Register</i> (aktivierte Bits)	Kap. 2.3
	set Questionable EnR	read Questionable EnR	<i>Questionable Status Enable Register</i> (aktivierte Bits)	Kap. 2.3
	set Questionable PtR	read Questionable PtR	<i>Questionable Status Ptransition Register</i> (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
	set Questionable NtR	read Questionable NtR	<i>Questionable Status Ntransition Register</i> (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Standard Event EvR	<i>Standard Event Event Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Service Request EnR	<i>Service Request Enable Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Status Byte EvR	<i>Status Byte Event Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Questionable EvR	<i>Questionable Status Event Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Questionable CoR	<i>Questionable Status Condition Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
	read Measure Current	tatsächlichen Strom messen	Kap. 2.2	

		read Measure Voltage	tatsächliche Spannung messen	Kap. 2.2
--	--	----------------------	------------------------------	----------

Tabelle A - 3: Alle Funktionen des Steuerprogramms für die Elektronische Last (*EL\_FGV.vi*)

Erste Case-Struktur	Zweite Case-Struktur	Beschreibung	Verweis
initialise	/	Sitzung öffnen; "Starteinstellungen"	Kap. 4.2
close	/	"Schlusseinstellungen"; Sitzung schließen	Kap. 4.2
without parameter	set pref CC	<i>Output</i> ein/aus ist optimiert für CC-Modus	Kap. 2.1
	set pref CV	<i>Output</i> ein/aus ist optimiert für CV-Modus	Kap. 2.1
	set Current Step Up	Strom um bestimmten Wert erhöhen (Step)	Kap. 2.1
	set Current Step Down	Strom um bestimmten Wert senken (Step)	Kap. 2.1
	set Voltage Step Up	Spannung um bestimmten Wert erhöhen (Step)	Kap. 2.1
	set Voltage Step Down	Spannung um bestimmten Wert senken (Step)	Kap. 2.1
	set Remote	externe Steuerung (z.B. über PC), Tastensperre bis auf "Local"	Kap. 2.1
	set Remote with Lock	externe Steuerung, komplette Tastensperre	Kap. 2.1
	set Local	Lokale (Tasten am Gerät) oder externe Steuerung möglich	Kap. 2.1
	Output Protection Clear	Aufheben der <i>Output</i> -Sperrung (nach ausgelöster Schutzfunktion)	Kap. 2.1
	OCP Clear	<i>OCP Event</i> im <i>Questionable Status Event Register</i> wird gelöscht	Kap. 2.3
	OVP Clear	<i>OVP Event</i> im <i>Questionable Status Event Register</i> wird gelöscht	Kap. 2.3
	Reset	Reset: Standardwerte	Kap. 2.1
	Clear Status	Löschen der <i>Event Register</i> aller Registergruppen	Kap. 2.3
	Sense 2wire	Spannungsmessung intern	Kap. 2.1
	Sense 4wire	Spannungsmessung extern	Kap. 2.1
	wait to continue	wartet, bis alle vorherigen Befehle ausgeführt sind	
Preset Ques EnR	Zurücksetzen des <i>Questionable Enable Registers</i> auf Standardeinstellungen	Kap. 2.3	
"set and read string"	read Preferred Mode	bevorzugten Modus auslesen	Kap. 2.1
	read Remote_or_Local	„Remote“, „Remote with Lock“ oder „Local“ auslesen	Kap. 2.1

	read IDN	gibt Geräte-ID zurück	
	read Self-test	Selbsttest durchführen und Ergebnis auslesen	
	read error	erstes Element des Fehlerspeichers auslesen	Kap. 2.1
	read buffer	<i>Output</i> -Speicher auslesen	
	read Sense Mode	Spannungsmessung intern/ extern auslesen	Kap. 2.1
	set free command	manueller Befehl	

Erste Case-Struktur	Zweite Case-Struktur		Beschreibung	Verweis
	„set“	„read“		
"set and read boolean"	set Output State	read Output State	<i>Output</i> ein/ aus	Kap. 2.1
	set OCP State	read OCP State	Status Überstromschutz (ein/aus)	Kap. 2.1
	set OVP State	read OVP State	Status Überspannungsschutz (ein/aus)	Kap. 2.1
	set Voltage Slew Rise Max	read Voltage Slew Rise Max	Spannungsänderungsrate für positive Veränderungen auf Maximum	
	set Voltage Slew Fall Max	read Voltage Slew Fall Max	Spannungsänderungsrate für negative Veränderungen auf Maximum	
		read Operation cmplt	gibt "1" zurück, wenn alle Befehle ausgeführt sind	
"set and read double"	set Current	read Set Current	Grenzwert Strom	Kap. 2.1
	set Current Step	read Current Step	Step-Wert für den Strom	Kap. 2.1
	set Voltage	read Set Voltage	Grenzwert Spannung	Kap. 2.1
	set Voltage Step	read Voltage Step	Step-Wert für die Spannung	Kap. 2.1
	set Output Delay Fall	read Output Delay Fall	Verzögerung beim Abschalten	Kap. 2.1
	set Output Delay Rise	read Output Delay Rise	Verzögerung beim Einschalten	Kap. 2.1
	set OCP Limit	read OCP Limit	Stromgrenze für die Überstromschutzfunktion (OCP)	Kap. 2.1
	set OCP Delay	read OCP Delay	Verzögerung bei Überschreiten der Grenze der OCP	Kap. 2.1

	set OVP Limit	read OVP Limit	Spannungsgrenze für die Überspannungsschutzfunktion (OVP)	Kap. 2.1
	set Voltage Slew Rise	read Voltage Slew Rise	Spannungsänderungsrate bei positiven Veränderungen	
	set Voltage Slew Fall	read Voltage Slew Fall	Spannungsänderungsrate bei negativen Veränderungen	
	set Standard Event EnR	read Standard Event EnR	<i>Standard Event Enable Register</i> (aktivierte Bits)	Kap. 2.3
	set Questionable EnR	read Questionable EnR	<i>Questionable Status Enable Register</i> (aktivierte Bits)	Kap. 2.3
		read Standard Event EvR	<i>Standard Event Event Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Service Request EnR	<i>Service Request Enable Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Status Byte EvR	<i>Status Byte Event Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Questionable EvR	<i>Questionable Status Event Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Questionable CoR	<i>Questionable Status Condition Register</i> auslesen (gesetzte Bits)	Kap. 2.3
		read Measure Current	tatsächlicher Strom	Kap. 2.1
		read Measure Voltage	tatsächliche Spannung	Kap. 2.1

Tabelle A - 4: Alle Funktionen des Steuerprogramms für das Power Supply (*PS\_FGV.vi*)

# B Anhang

## Steuerprogramm für die Elektronische Last (EL\_FGV.vi)

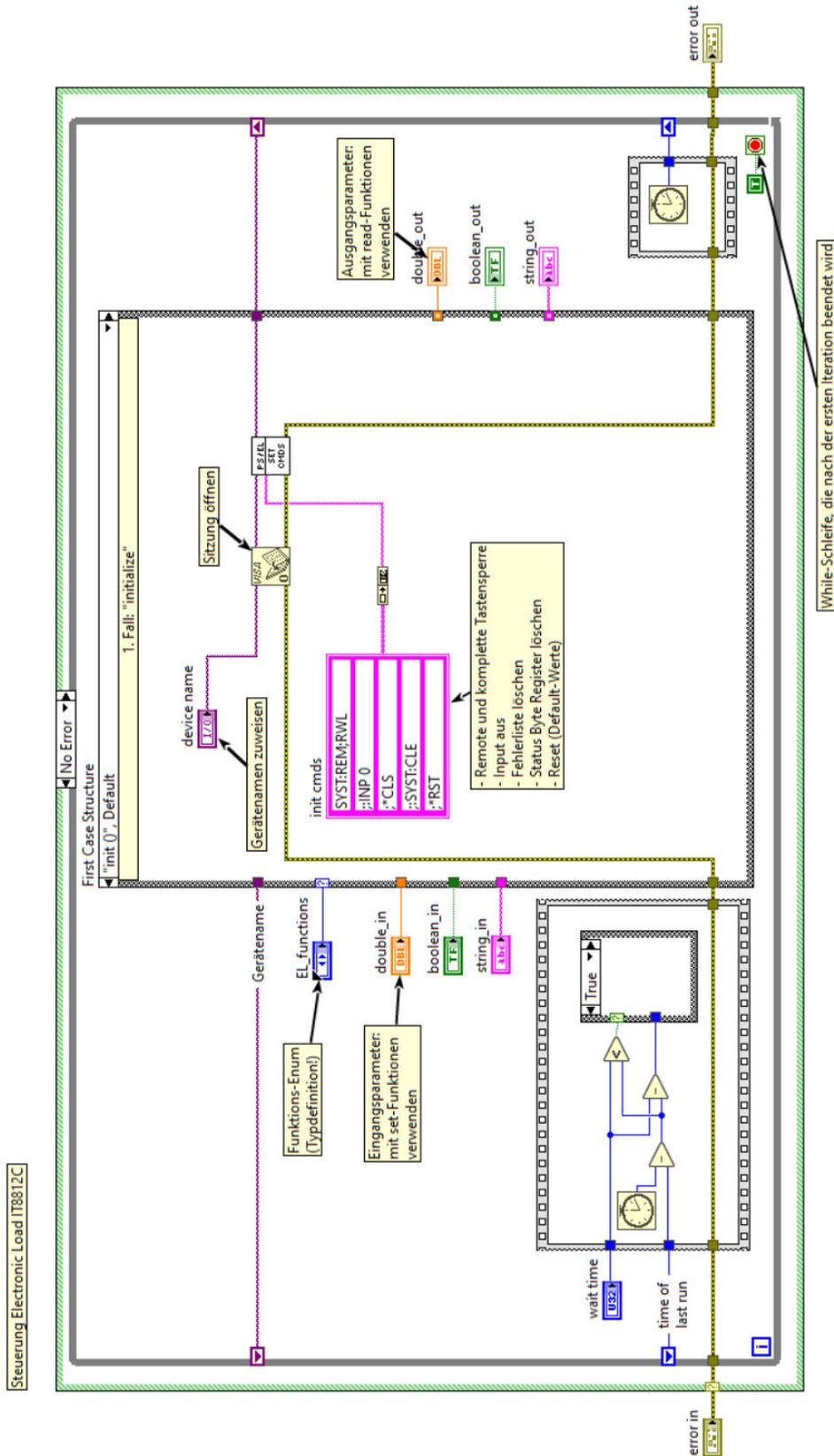


Abbildung B - 1: Block Diagram des Steuerprogramms für die Elektronische Last (EL\_FGV.vi)

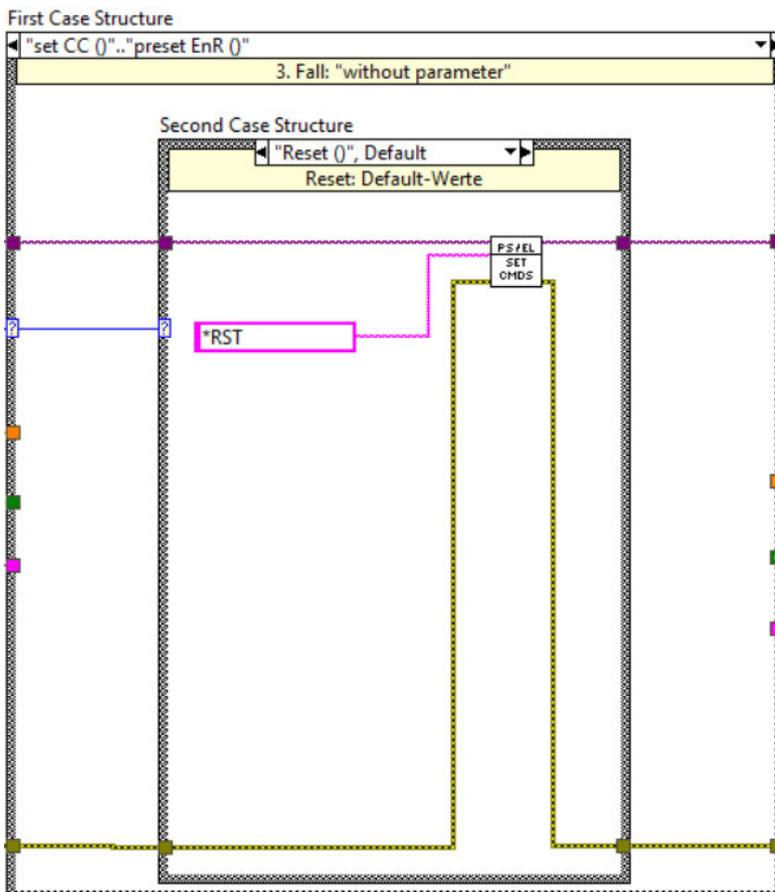
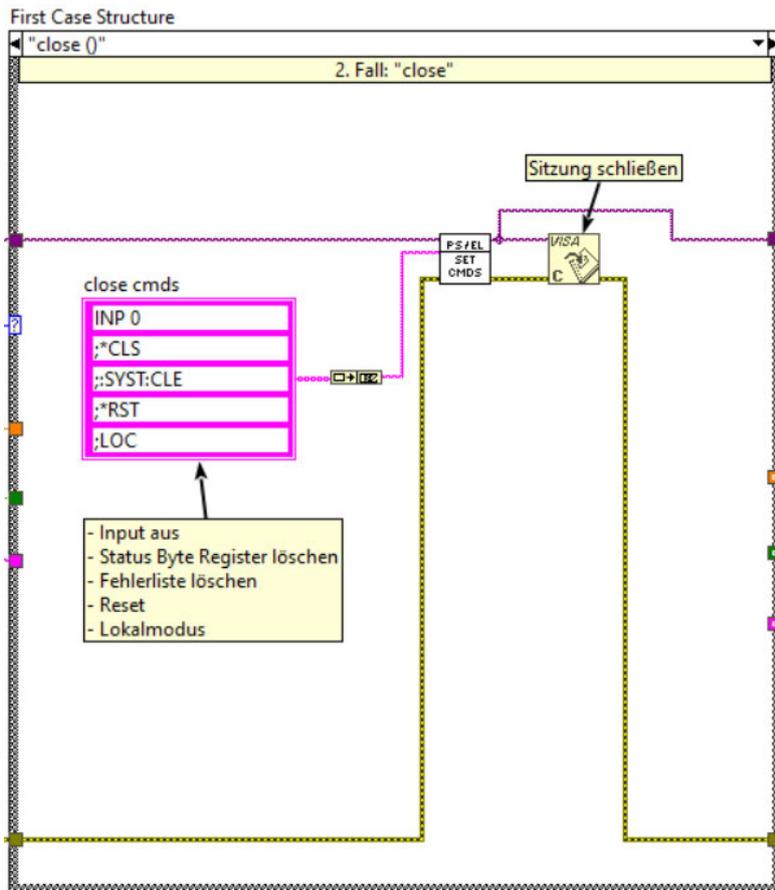


Abbildung B - 2: 2. Fall "Close" (oben) und 3. Fall "without parameter": "Reset ()" (unten)

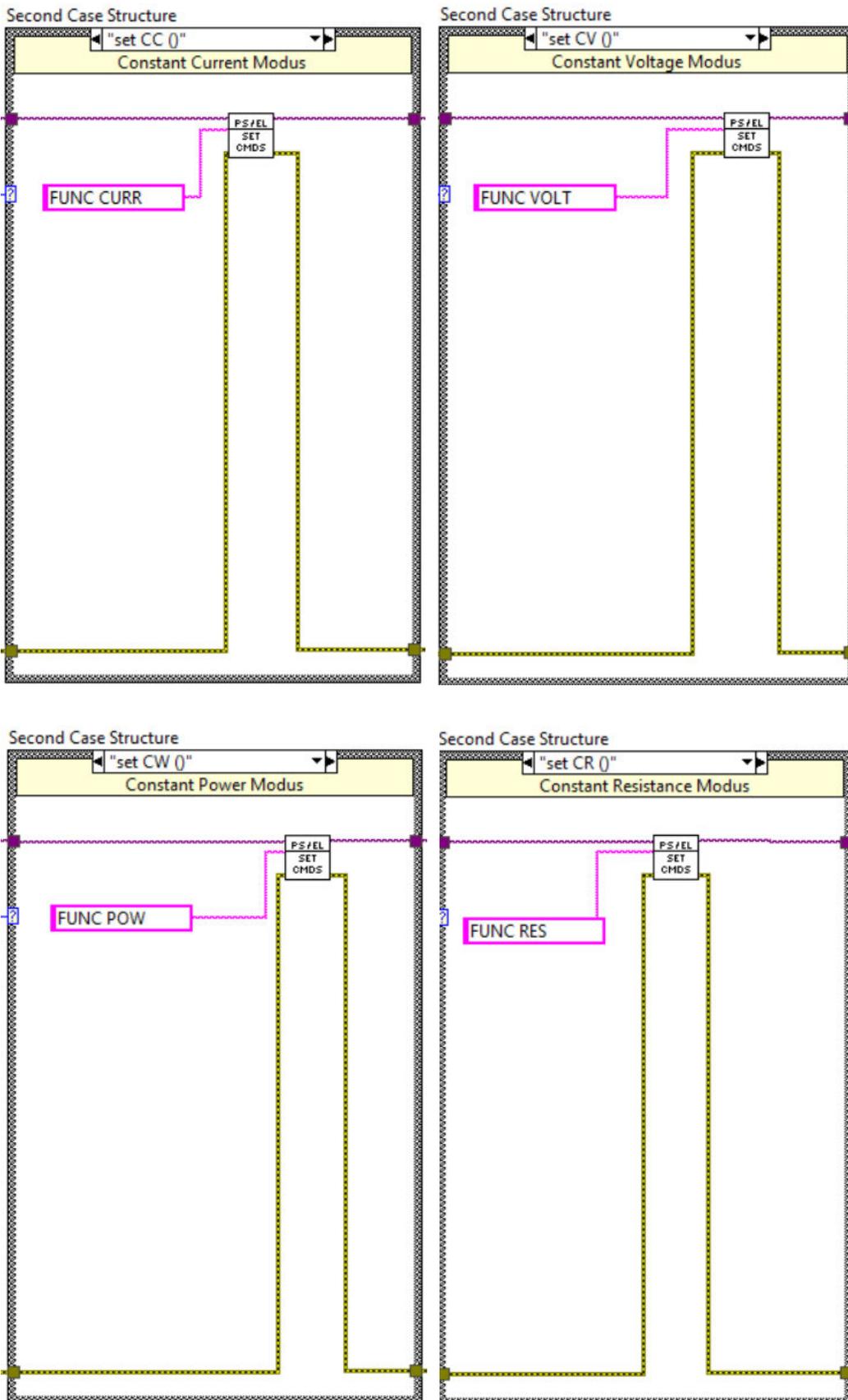


Abbildung B - 3: Zweite Case-Struktur: "set CC ()", "set CV ()" (oben), "set CW ()", "set CR ()" (unten)

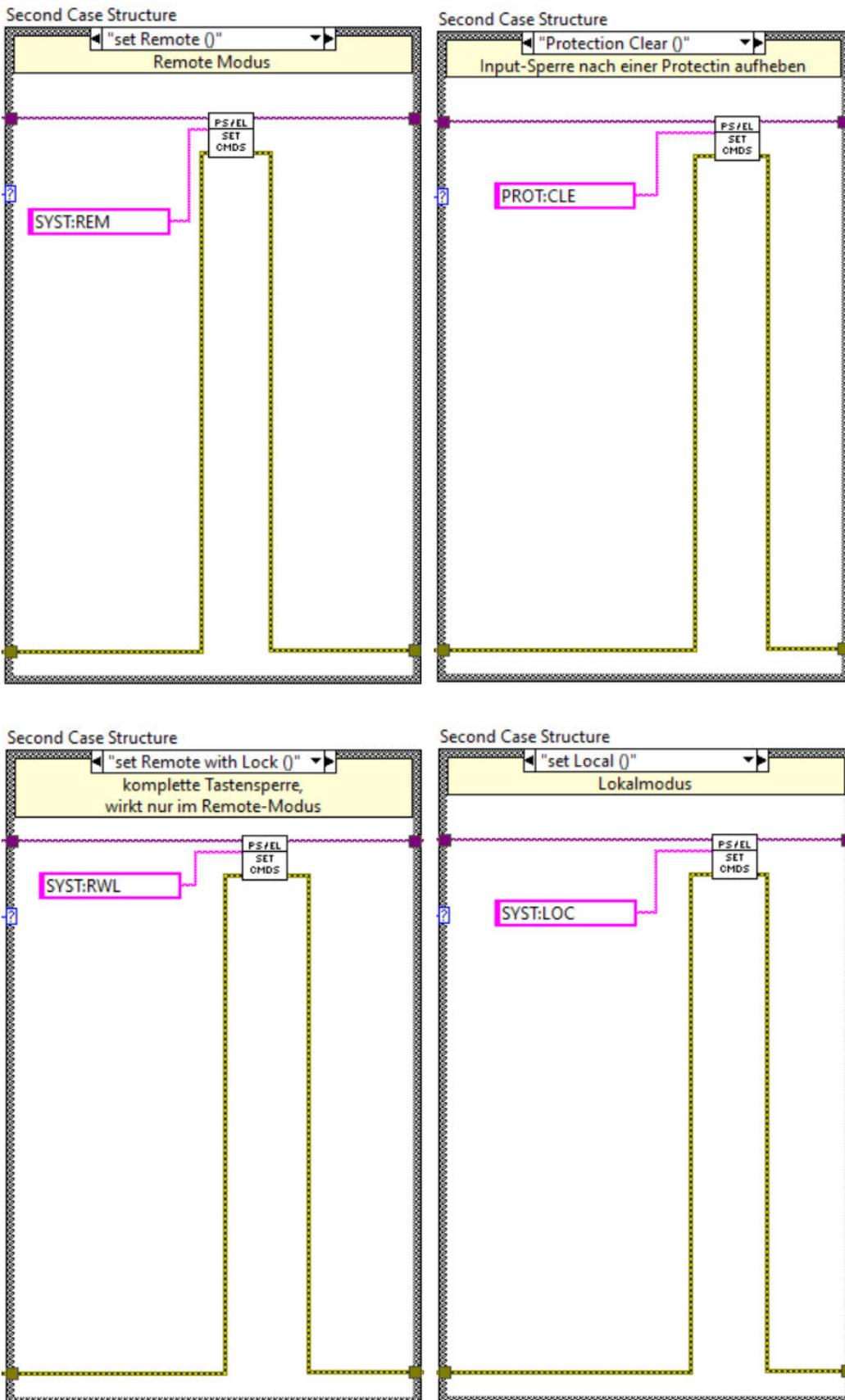


Abbildung B - 4: Zweite Case-Struktur: "set Remote ()", "set Remote with Lock ()" (oben), "set Local ()", "Protection Clear ()" (unten)

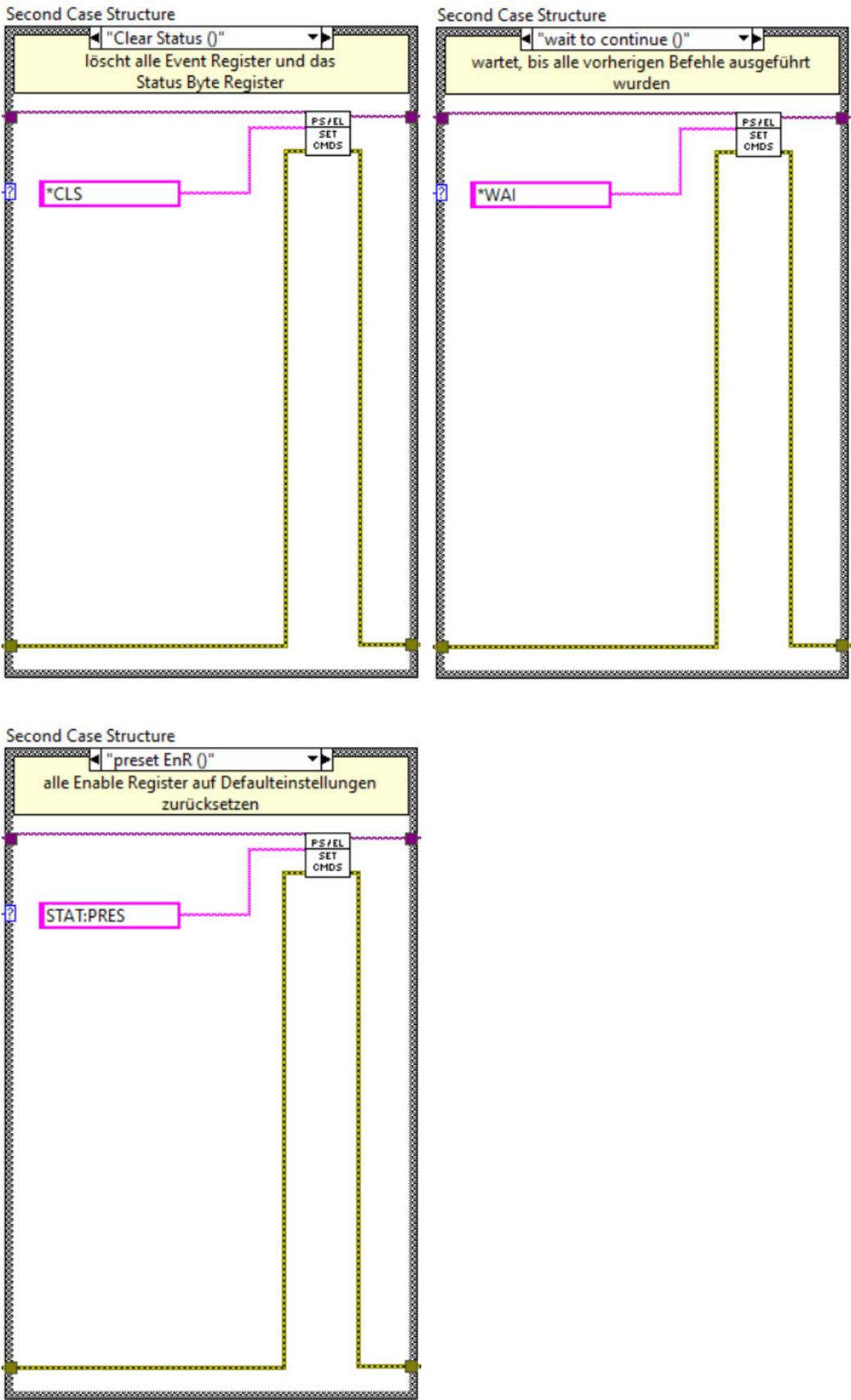
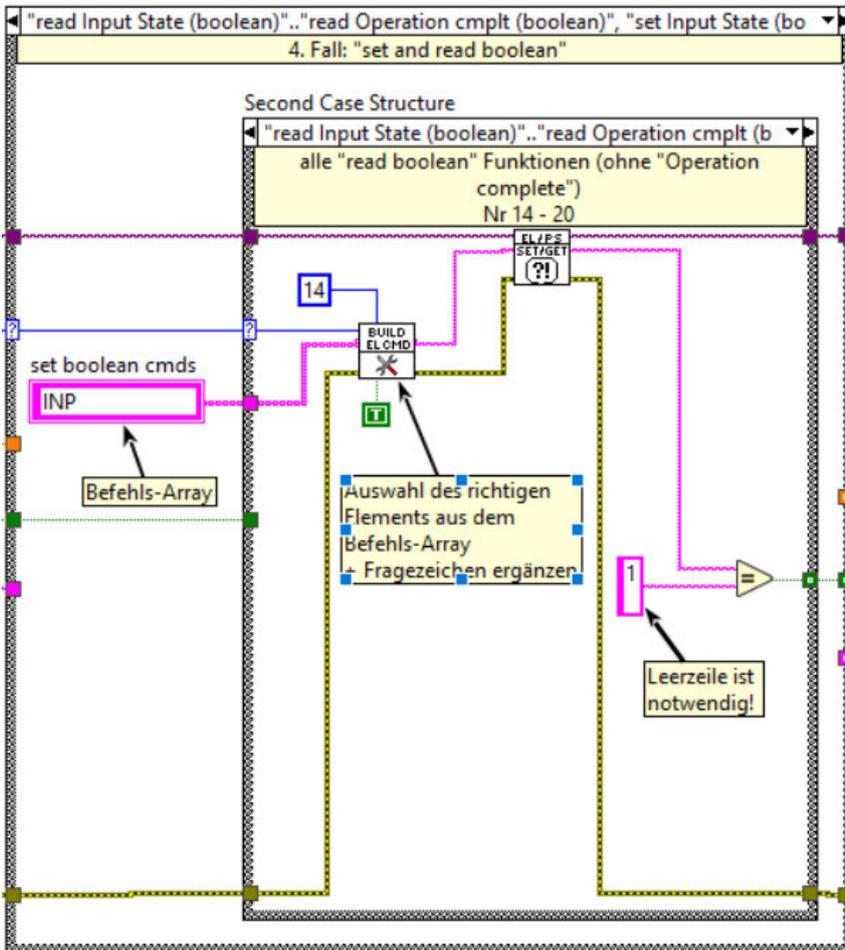


Abbildung B - 5: "Clear Status ()"; "wait to continue ()" (oben); "preset EnR ()" (unten)

First Case Structure



Second Case Structure

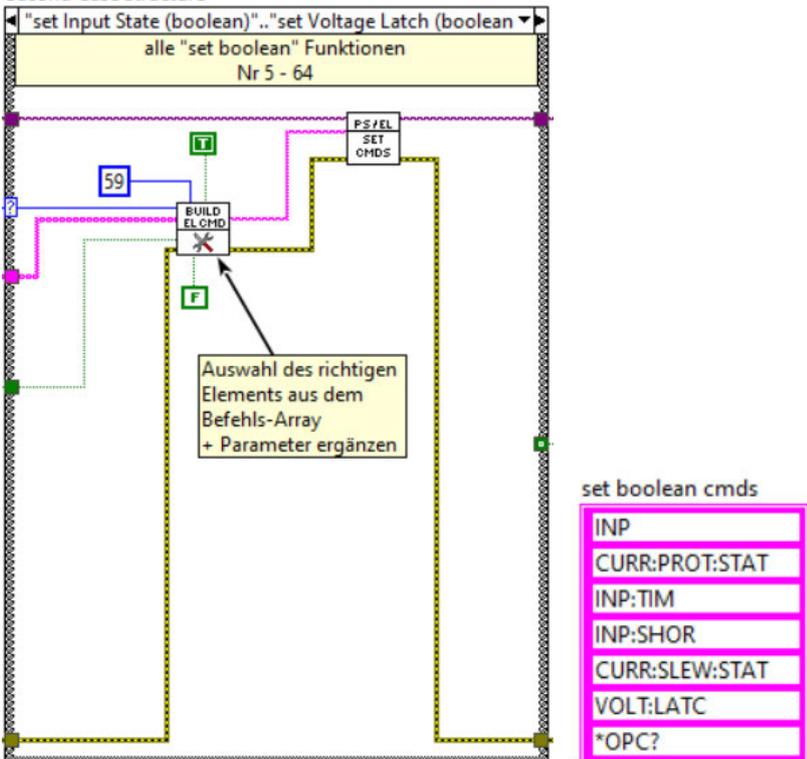


Abbildung B - 6: 4. Fall "set and read boolean" (oben); „set boolean“-Fall; Befehls-Array „set boolean cmds“ (unten)

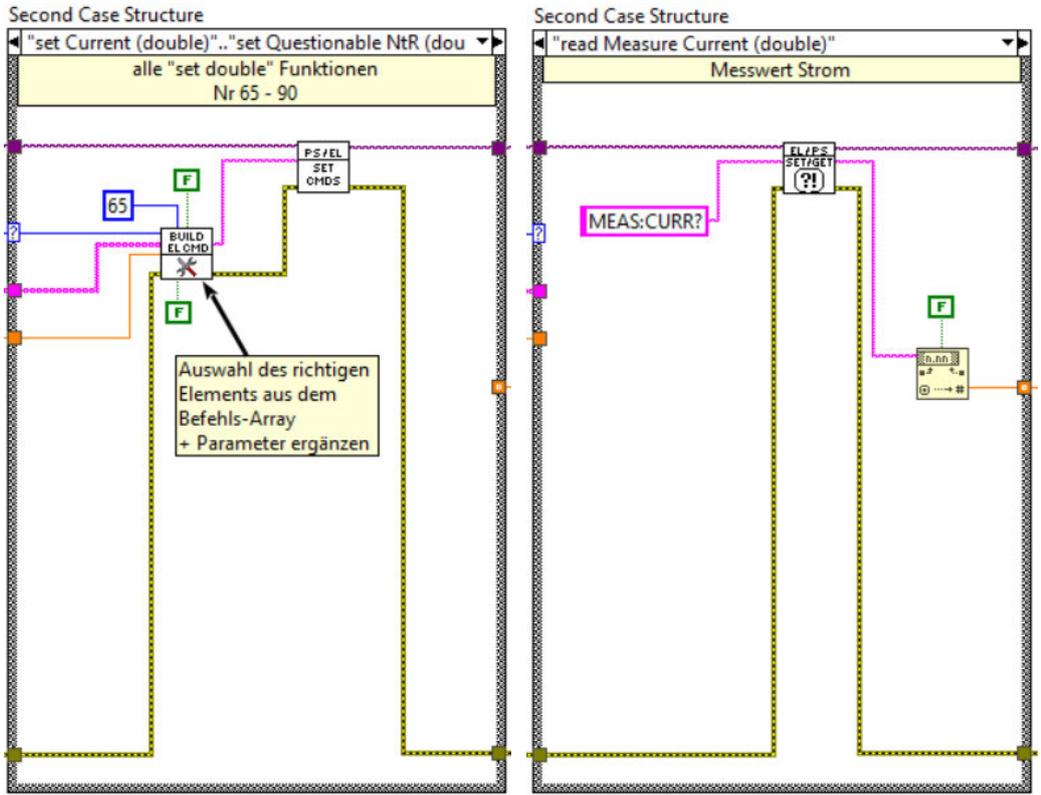
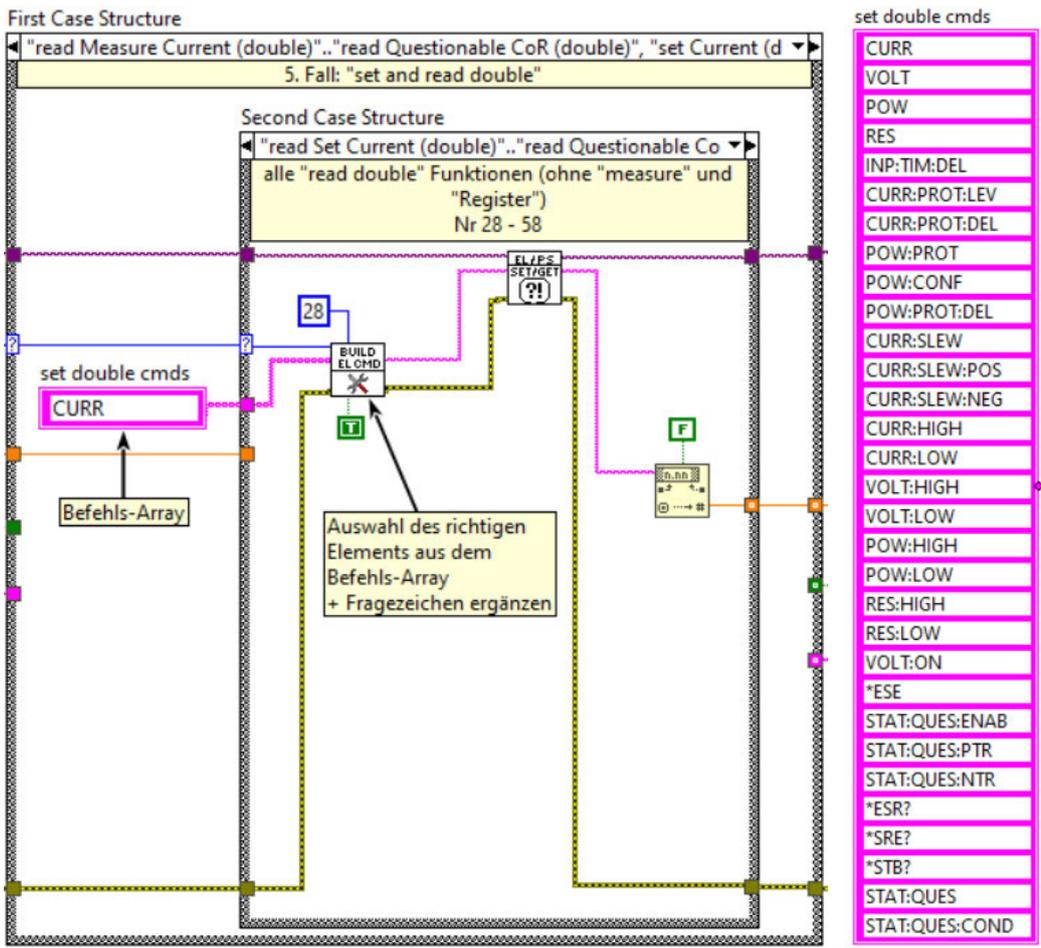


Abbildung B - 7: 5. Fall "set and read double"; Befehls-Array "set double cmds" (oben); „set double“-Fall; "read Measure Current (double)" (unten)

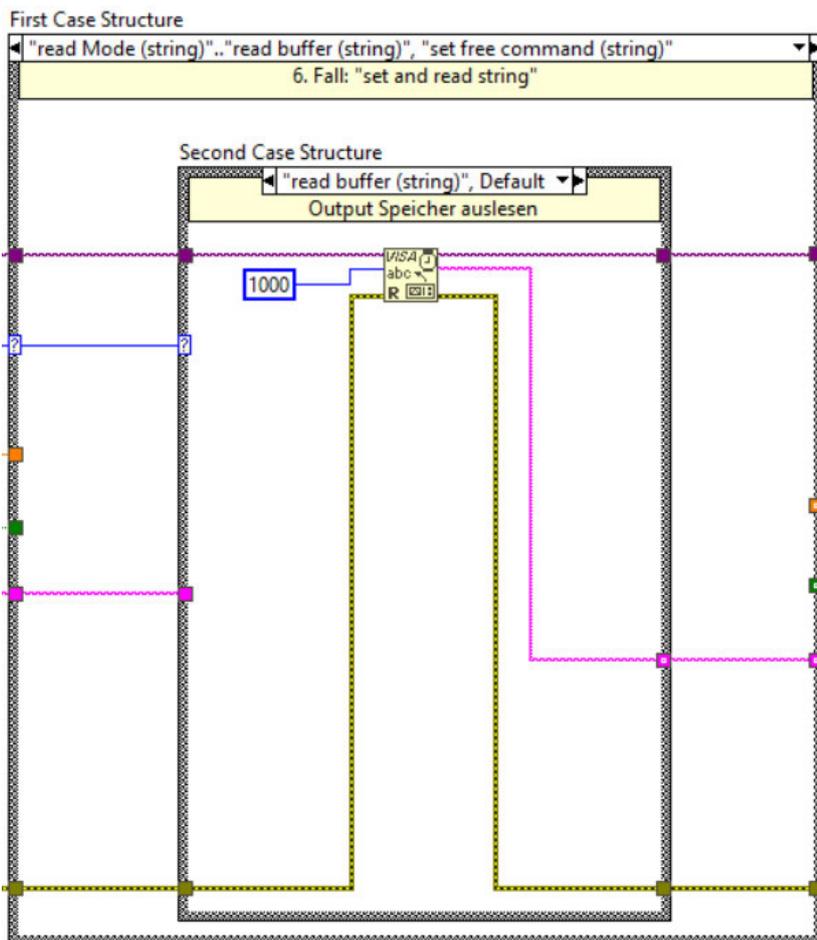
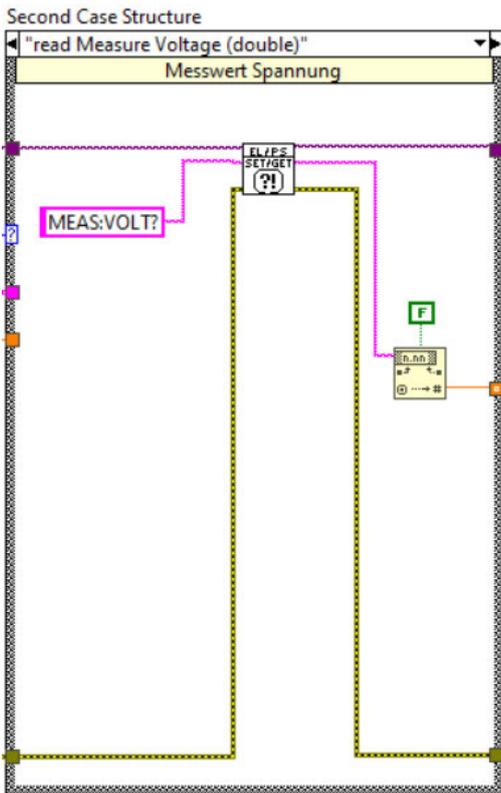


Abbildung B - 8: "read Measure Voltage (double)" (oben); 6. Fall "set and read string" (unten)

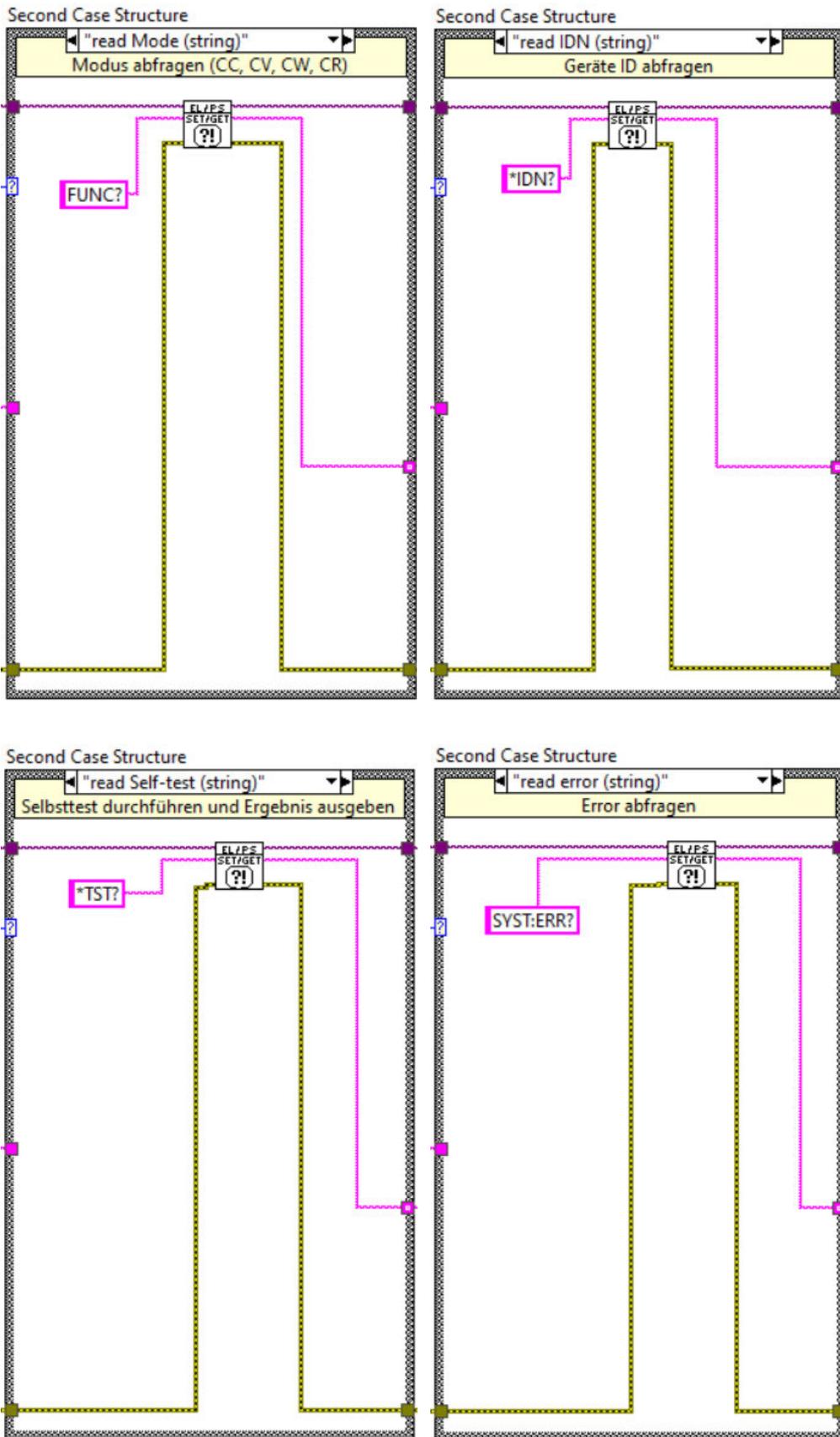


Abbildung B - 9: "read Mode (string)"; "read IDN (string)" (oben); "read Self-test (string); "read error (string)" (unten)

Second Case Structure

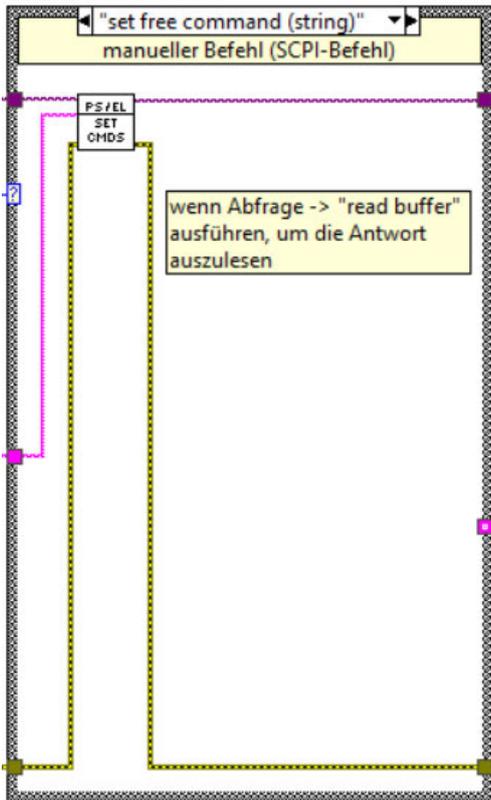


Abbildung B - 10: "set free command (string)"

# Steuerprogramm für das Power Supply (PS\_FGV.vi)

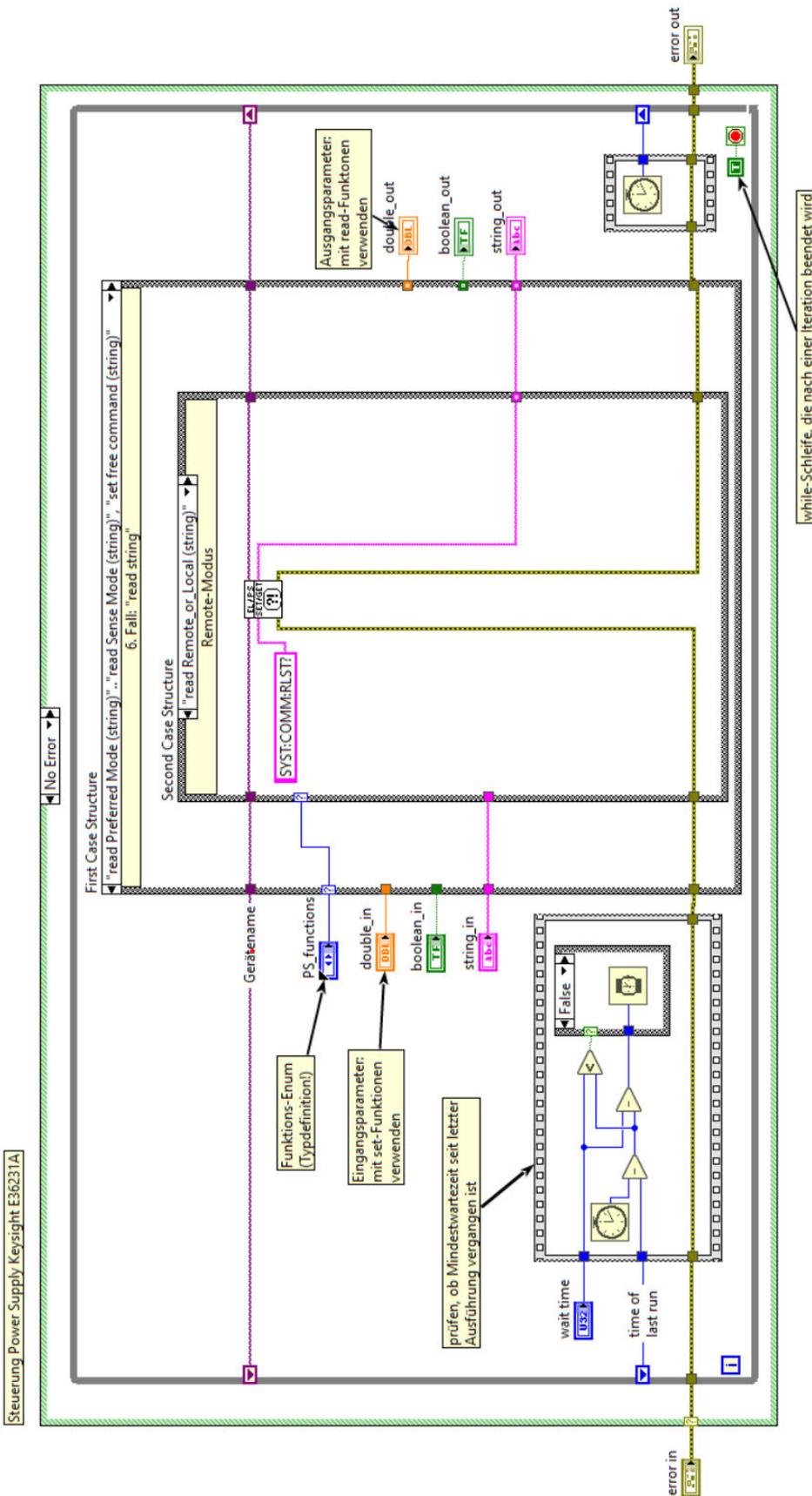


Abbildung B - 11: Block Diagram des Steuerprogramms für das Power Supply (PS\_FGV.vi)

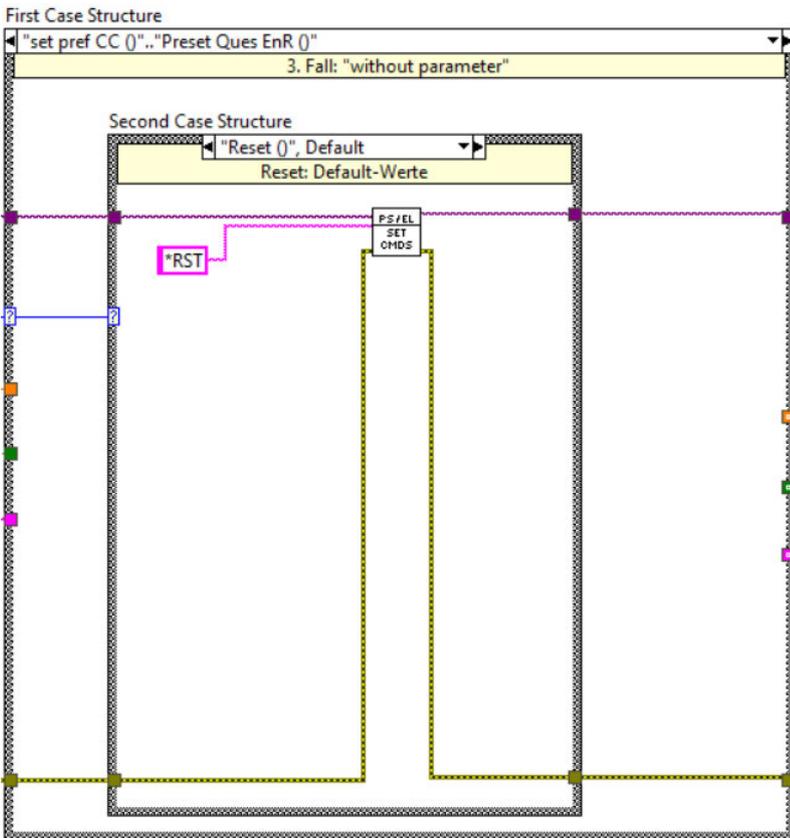
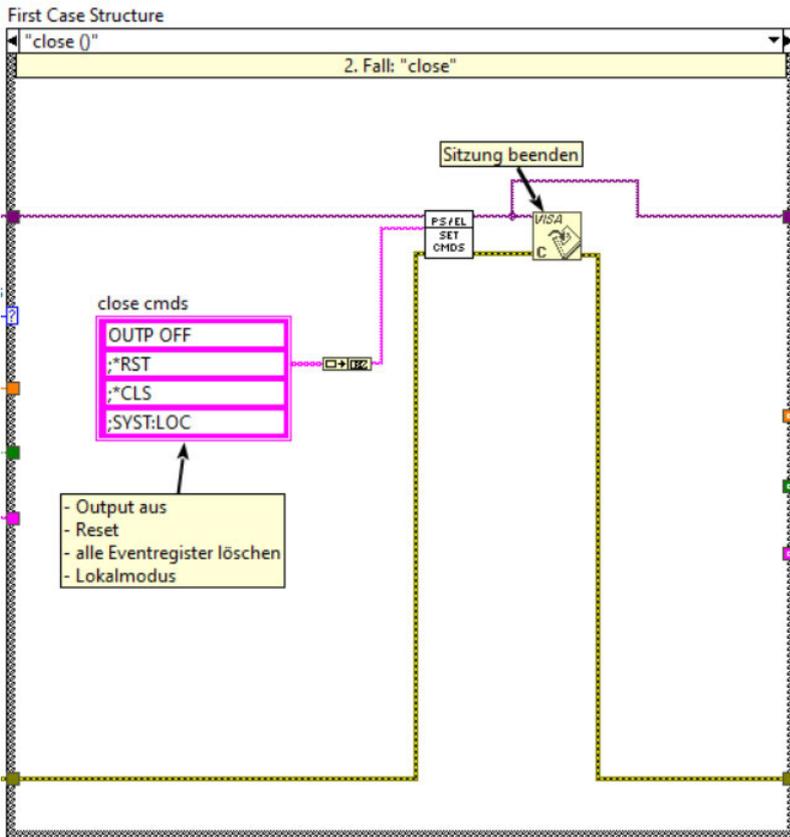


Abbildung B - 12: 2. Fall "Close" (oben); 3. Fall "without parameter": „Reset“ (unten)

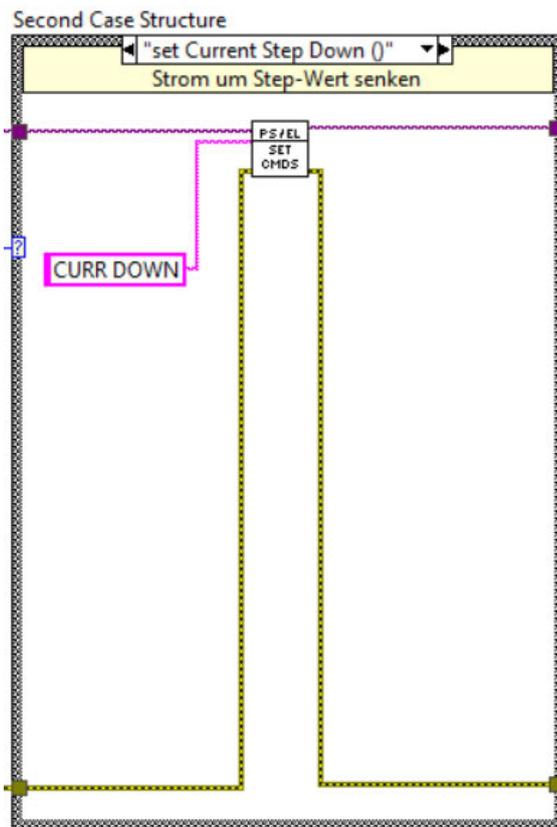
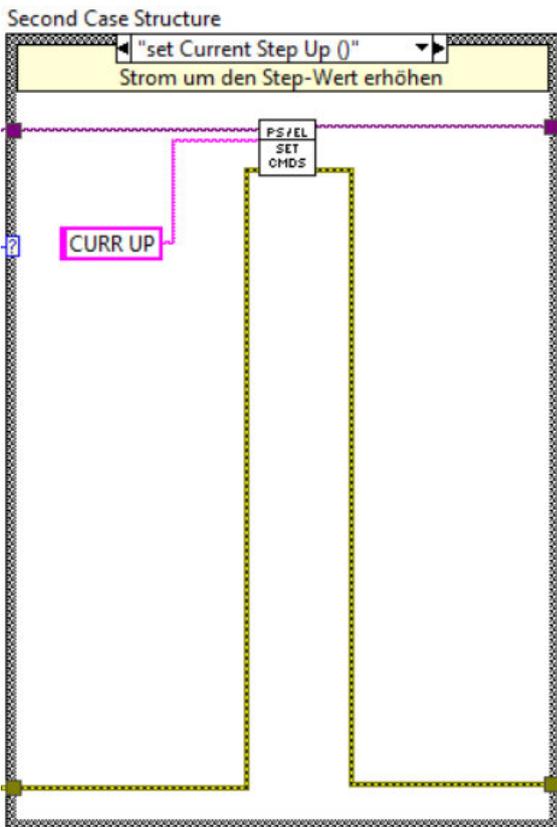
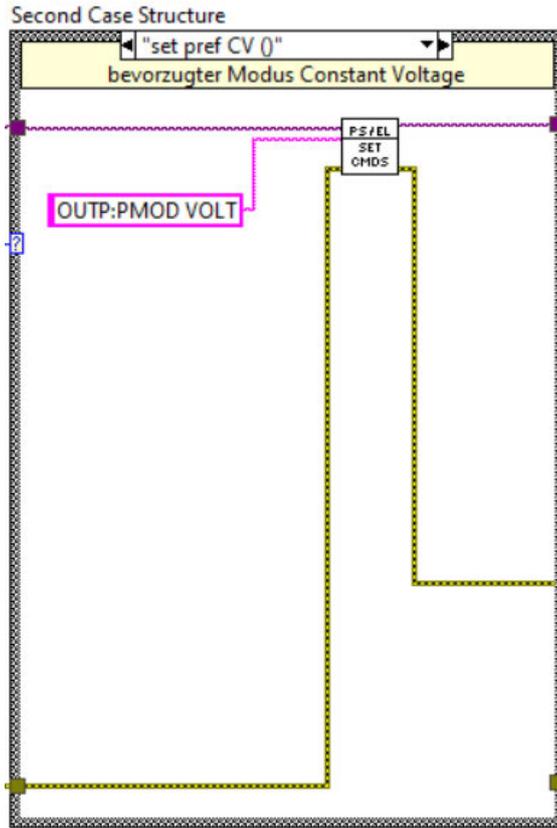
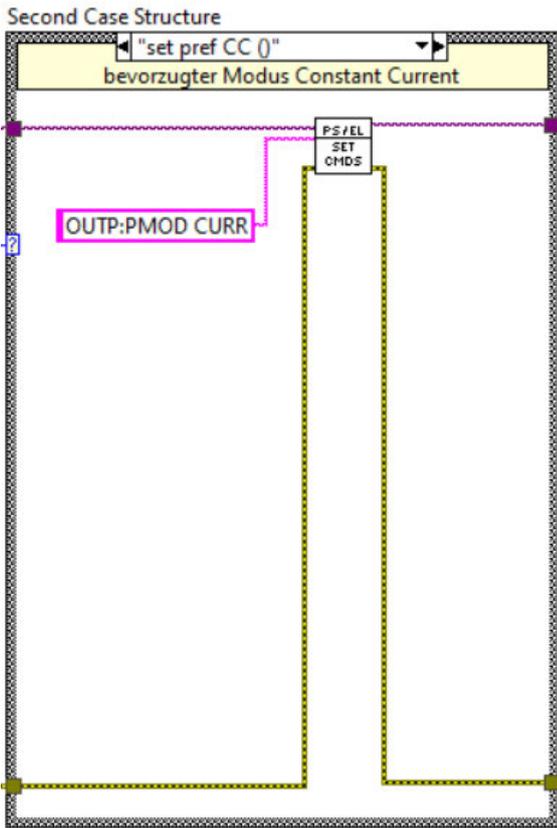


Abbildung B - 13: "set pref CC ()"; ""set pref CV ()" (oben); "set Current Step Up ()"; "set Current Step Down ()" (unten)

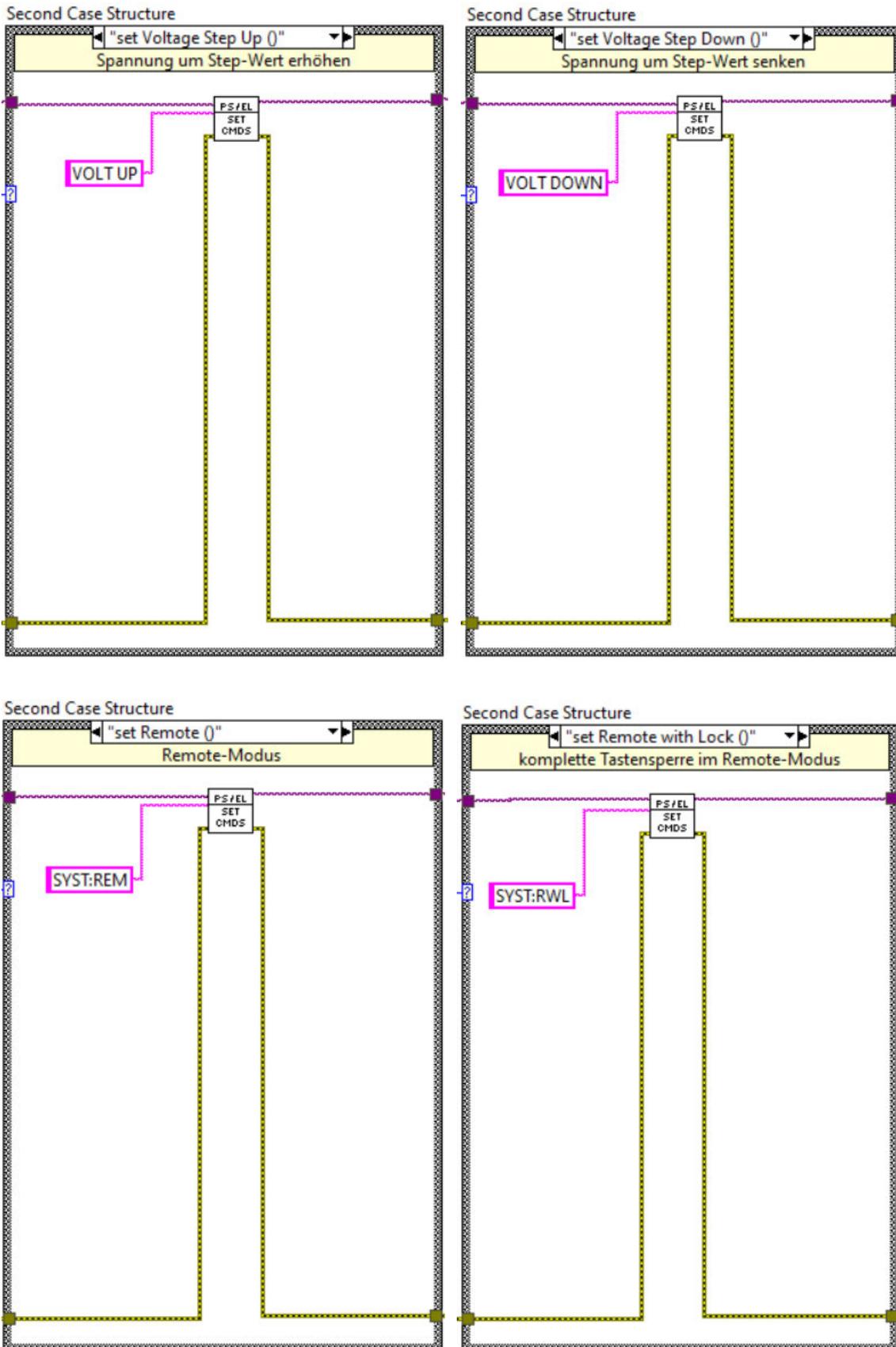


Abbildung B - 14: "set Voltage Step Up ()"; "set Voltage Step Down ()" (oben); "set Remote ()"; "set Remote with Lock ()" (unten)

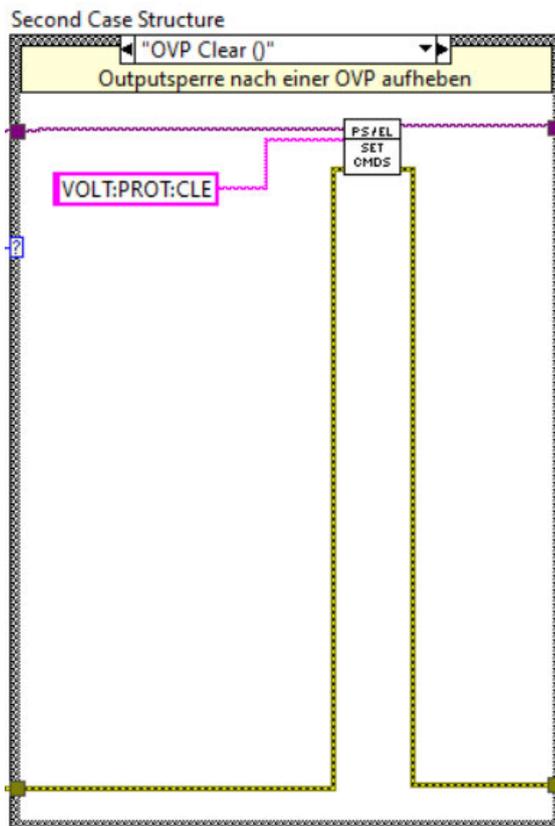
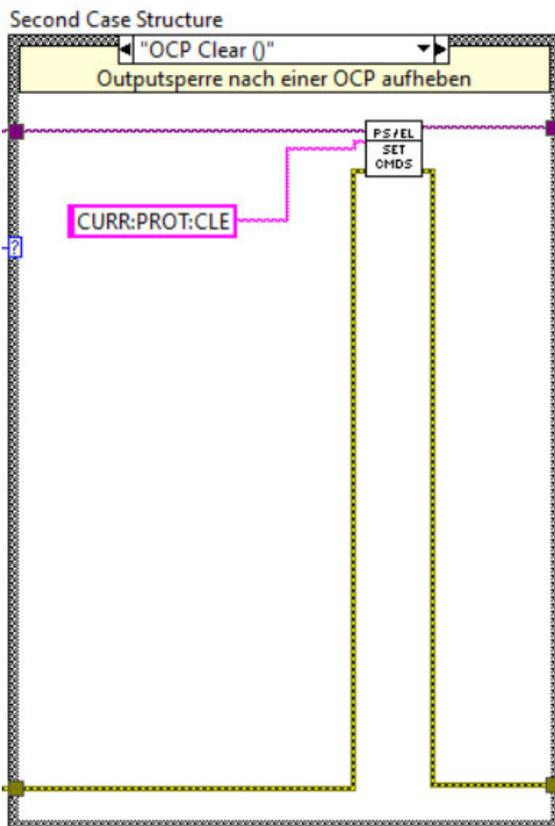
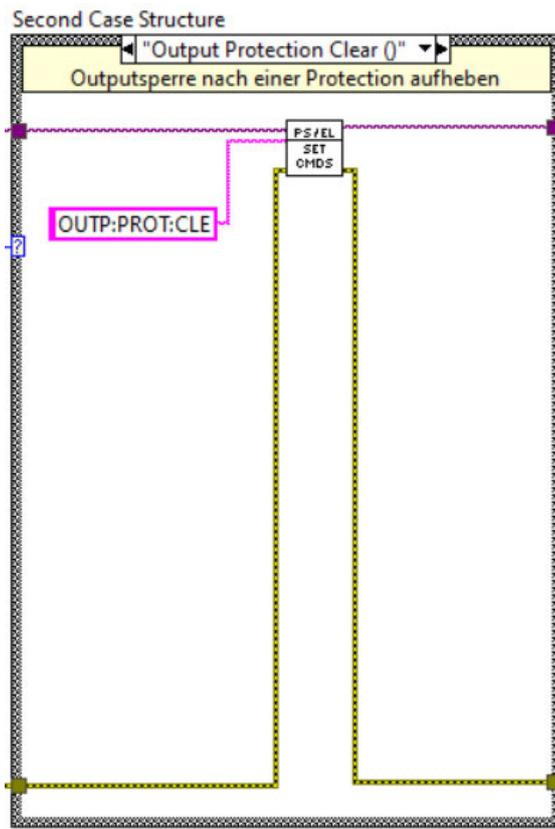
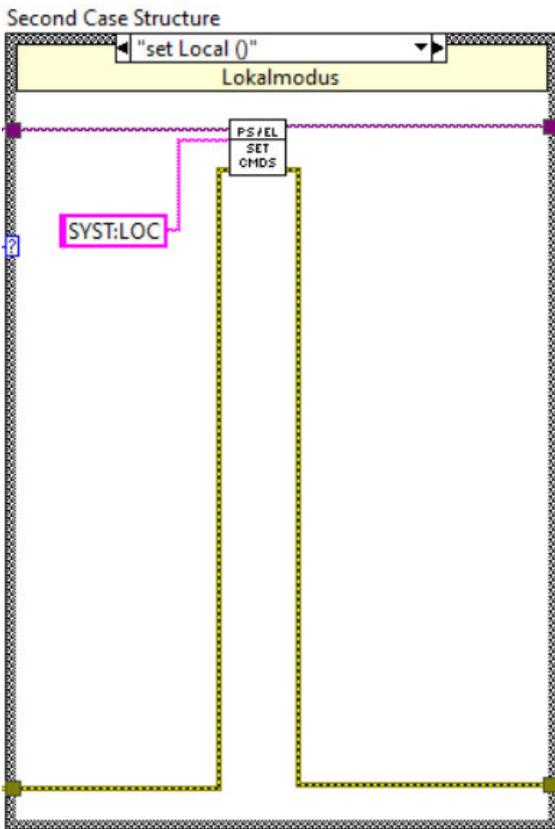


Abbildung B - 15: "set Local ()"; "Output Protection Clear ()" (oben); "OCP Clear ()"; "OVP Clear ()" (unten)

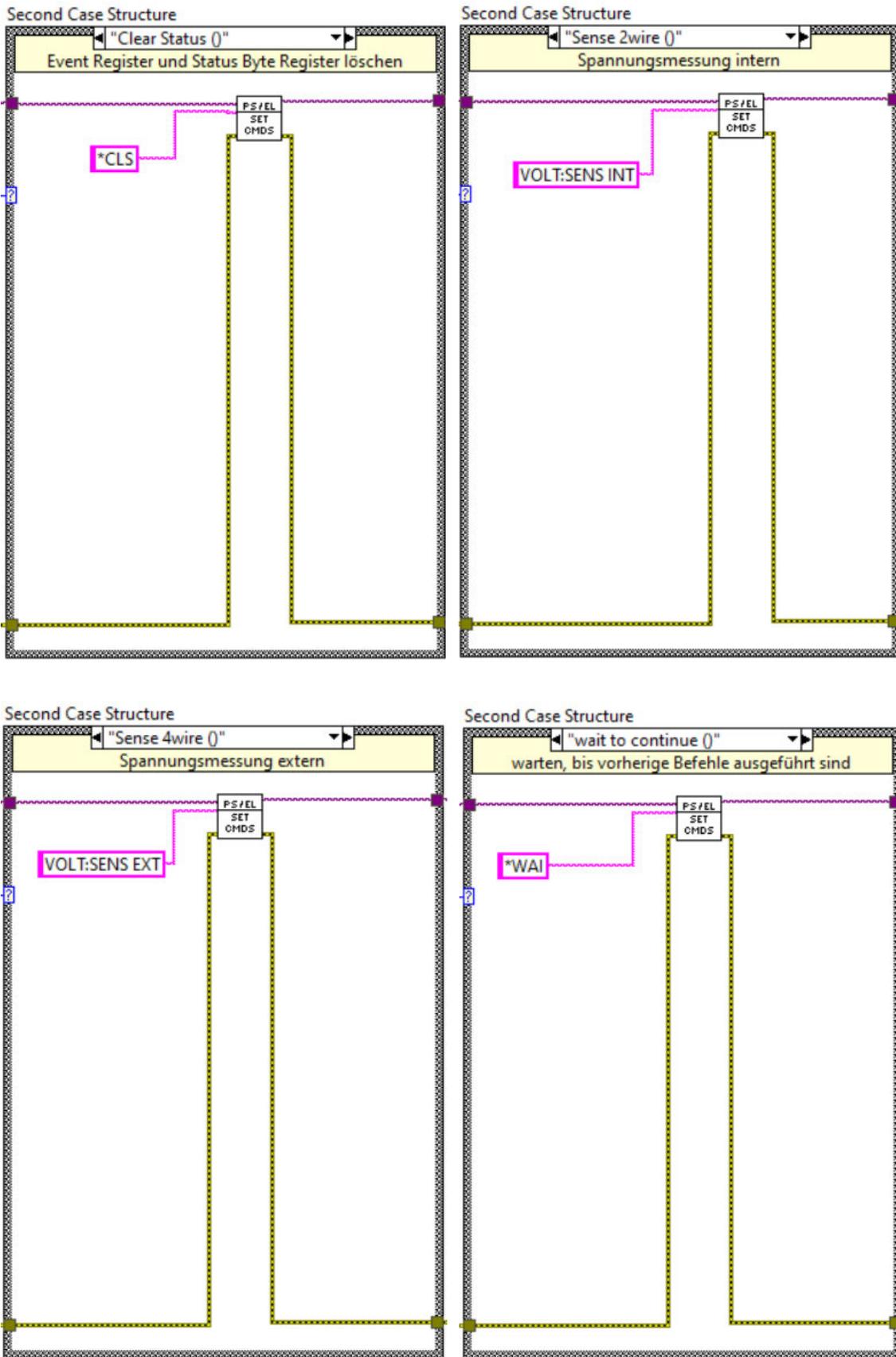


Abbildung B - 16: "Clear Status ()"; "Sense 2wire ()" (oben); "Sense 4wire ()"; "wait to continue ()" (unten)

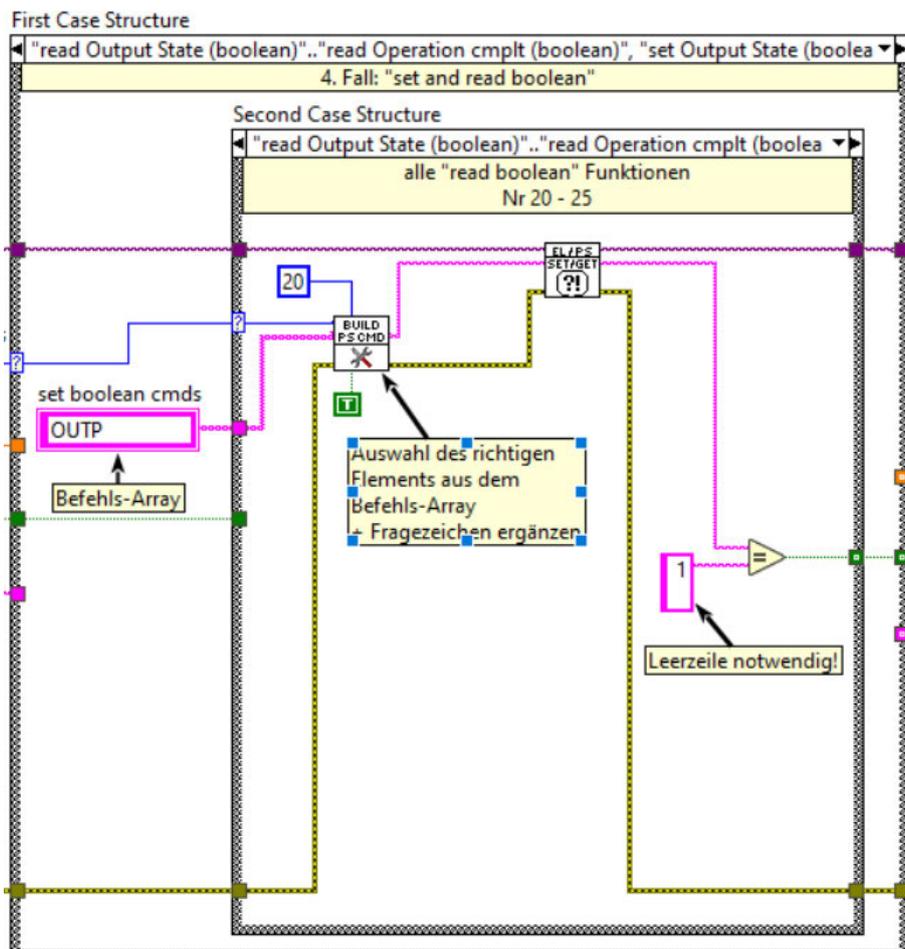
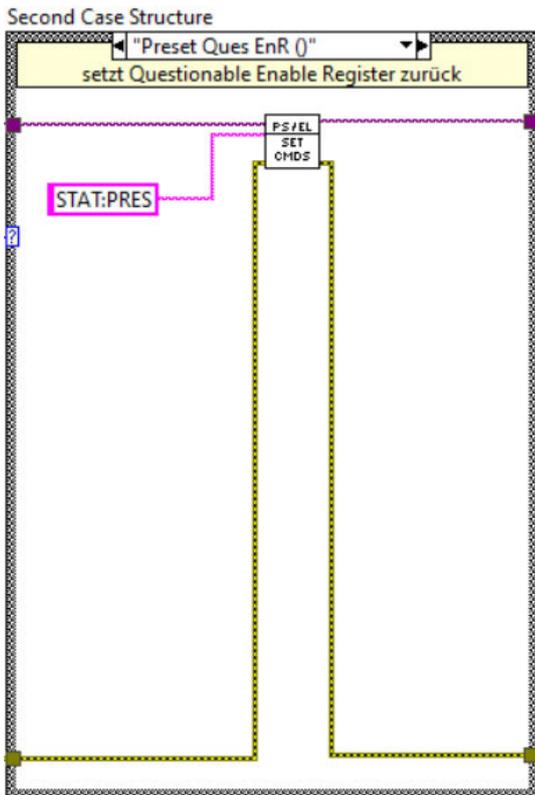


Abbildung B - 17: "Preset Ques EnR ()" (oben); 4. Fall: "set and read boolean" (unten)

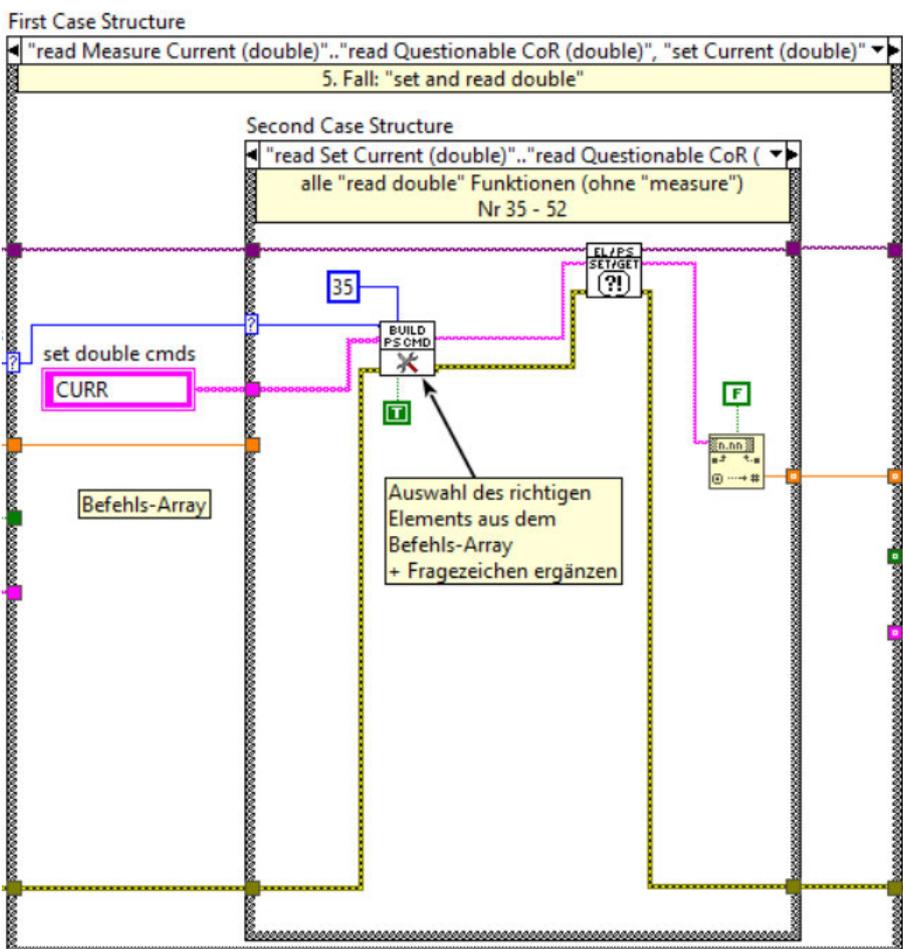
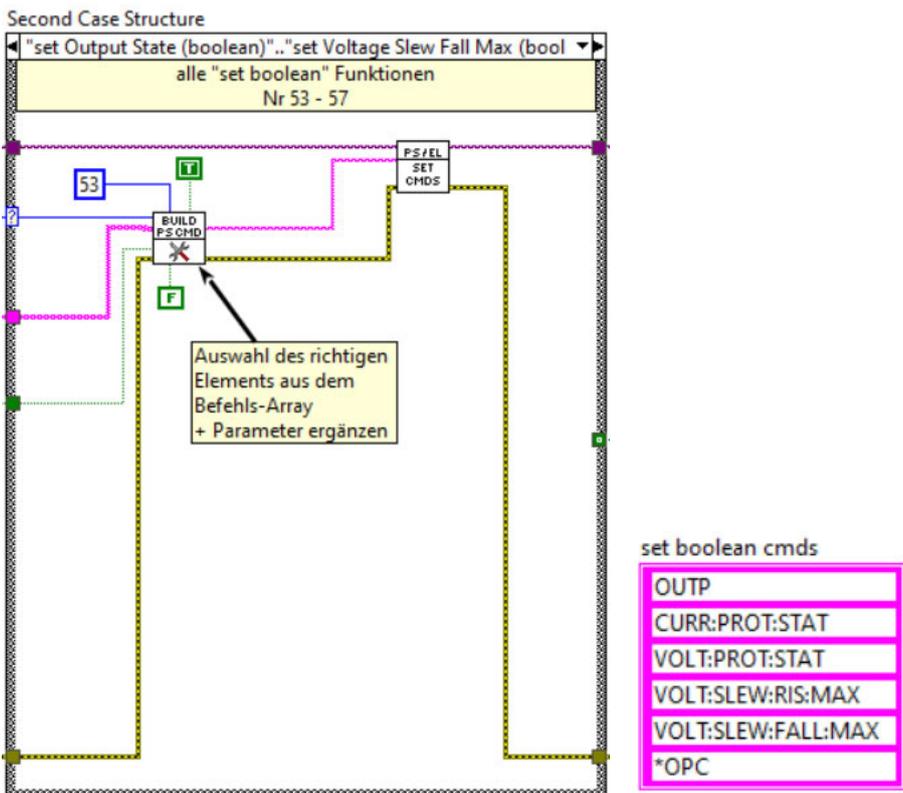
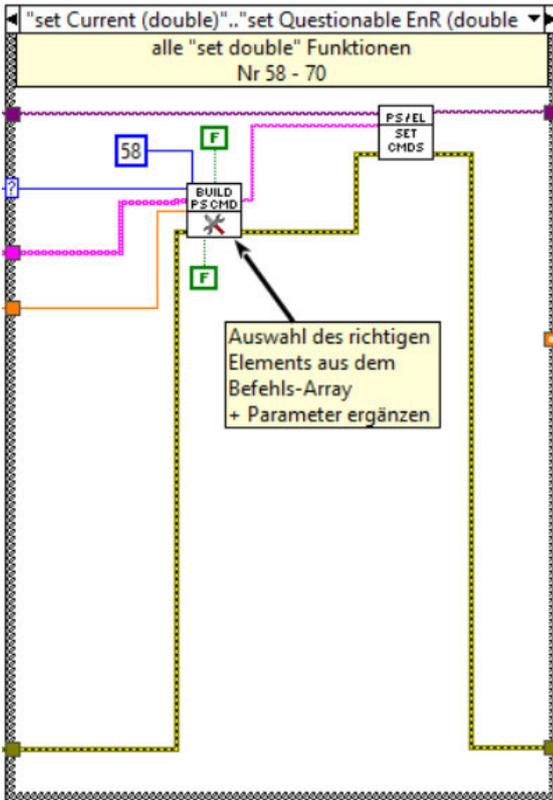


Abbildung B - 18: „set boolean“-Funktionen; Befehls-Array „set boolean cmds“ (oben); 5. Fall: "set and read double" (unten)

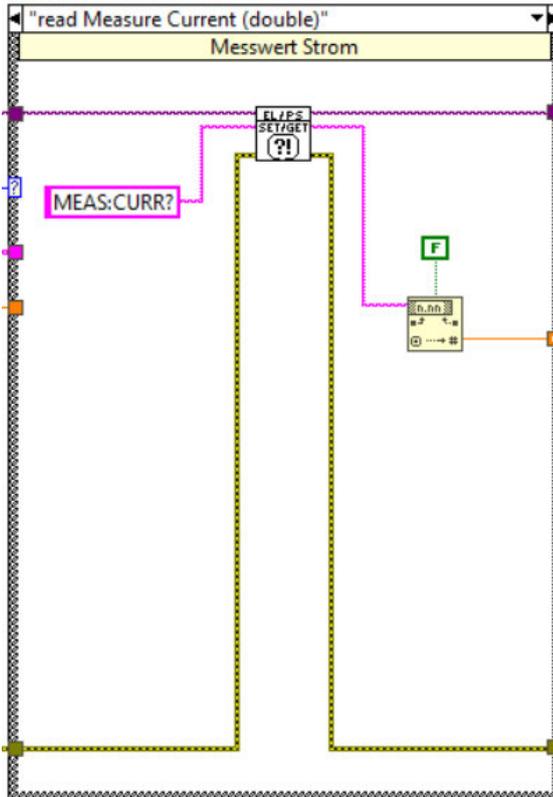
Second Case Structure



set double cmds

CURR
CURR:STEP
VOLT
VOLT:STEP
OUTP:DEL:FALL
OUTP:DEL:RISE
CURR:PROT
CURR:PROT:DEL
VOLT:PROT
VOLT:SLEW:RIS
VOLT:SLEW:FALL
*ESE
STAT:QUES:ENAB
*ESR
*SRE
*STB
STAT:QUES
STAT:QUES:COND

Second Case Structure



Second Case Structure

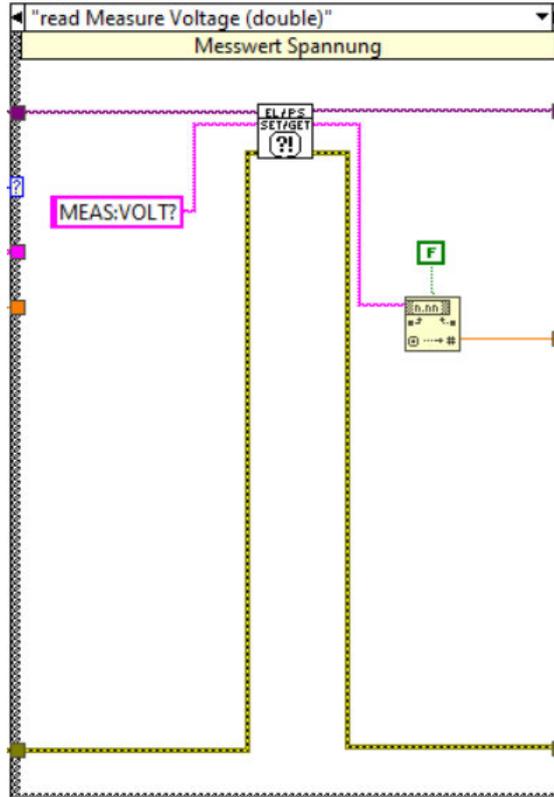


Abbildung B - 19: „set double“-Funktionen; Befehls-Array „set double cmds“ (oben); "read Measure Current (Double)"; "read Measure Voltage (Double)" (unten)

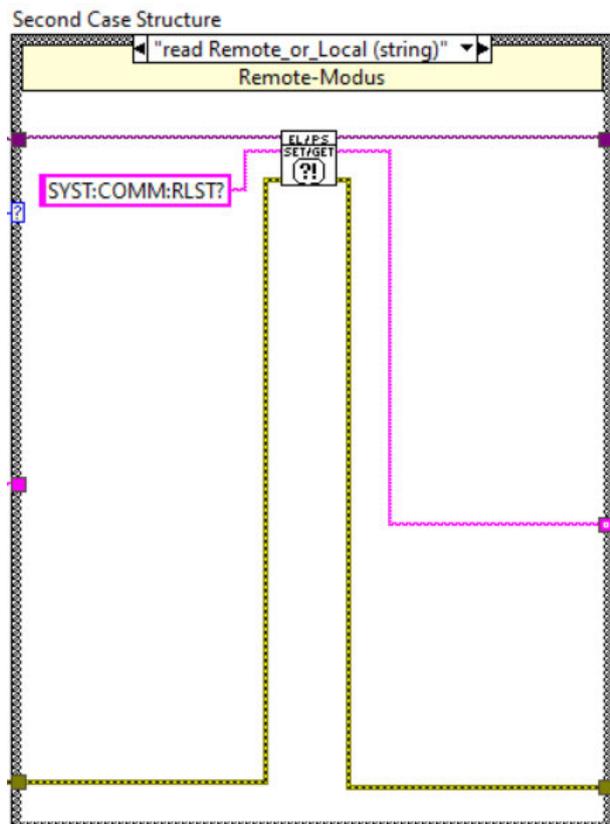
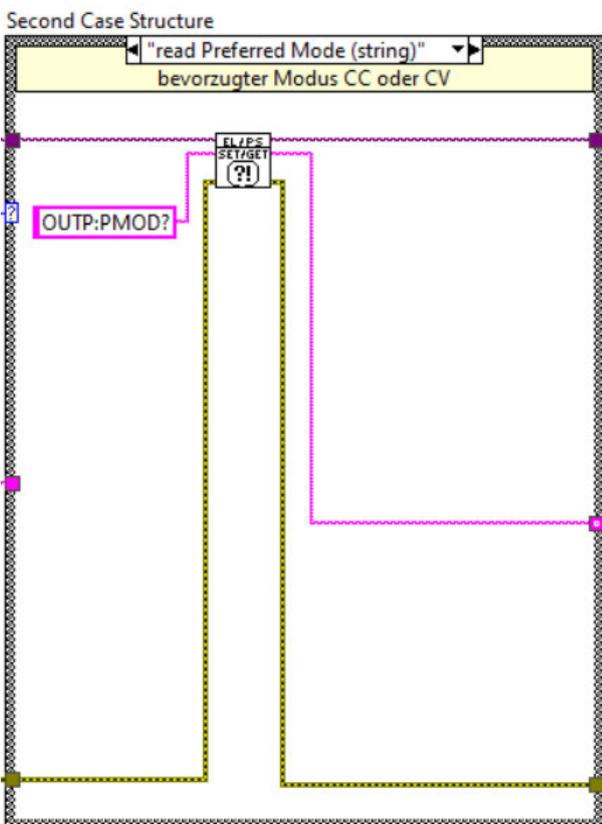
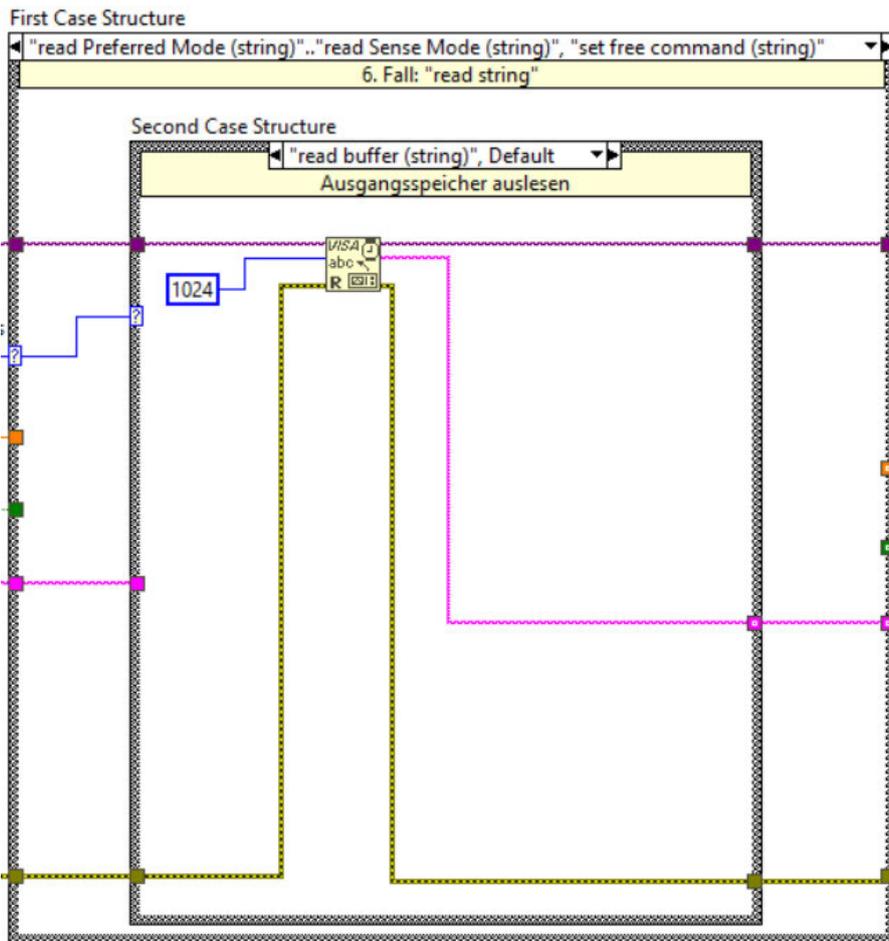


Abbildung B - 20: 6. Fall "set and read string" (oben); "read Preferred Mode (string)"; "read Remote\_or\_Local (string)" (unten)

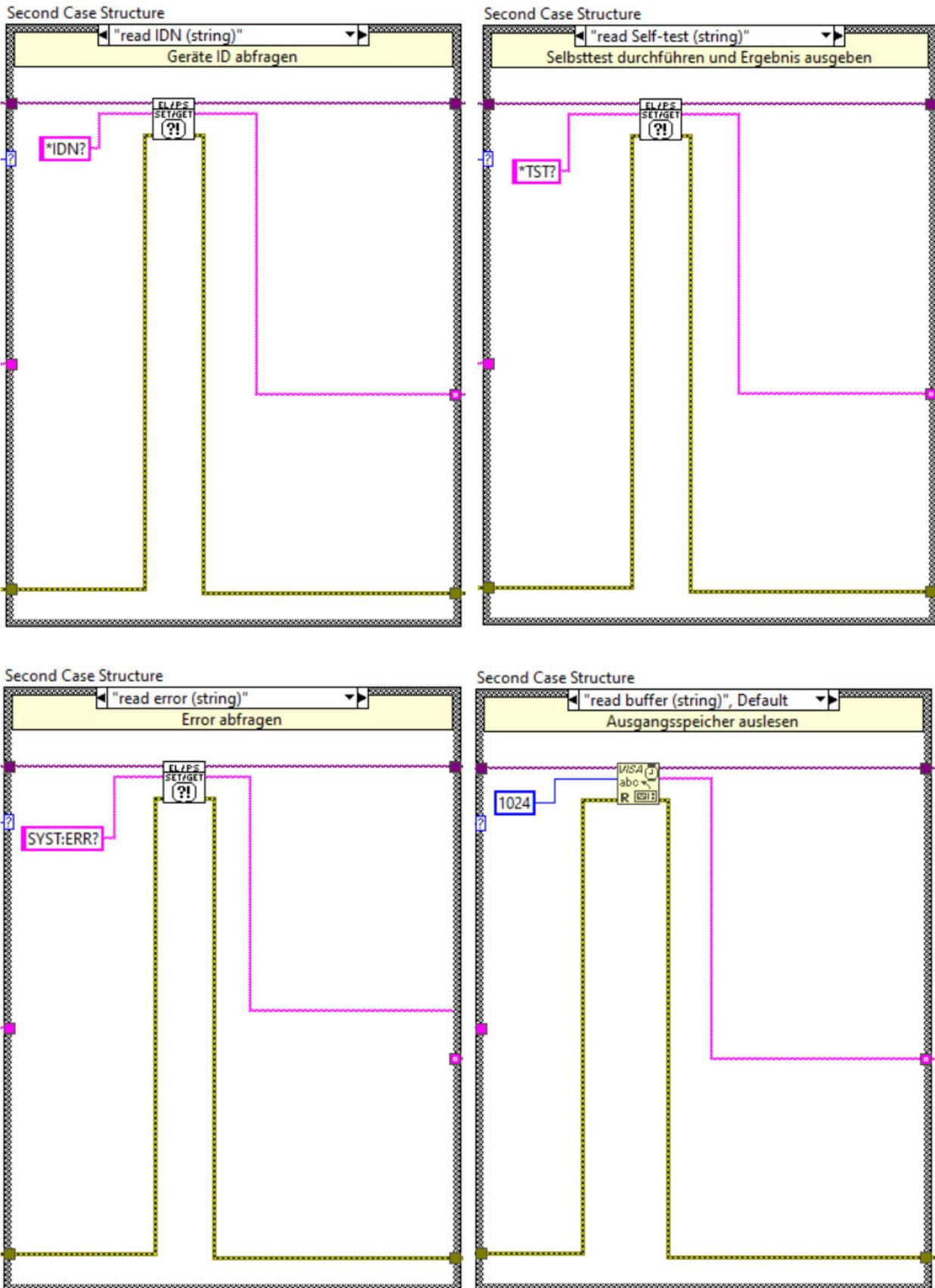


Abbildung B - 21: "read IDN (string)"; read Self-test (string)" (oben); "read error (string)"; "read Sense Mode (string)" (unten)

Second Case Structure

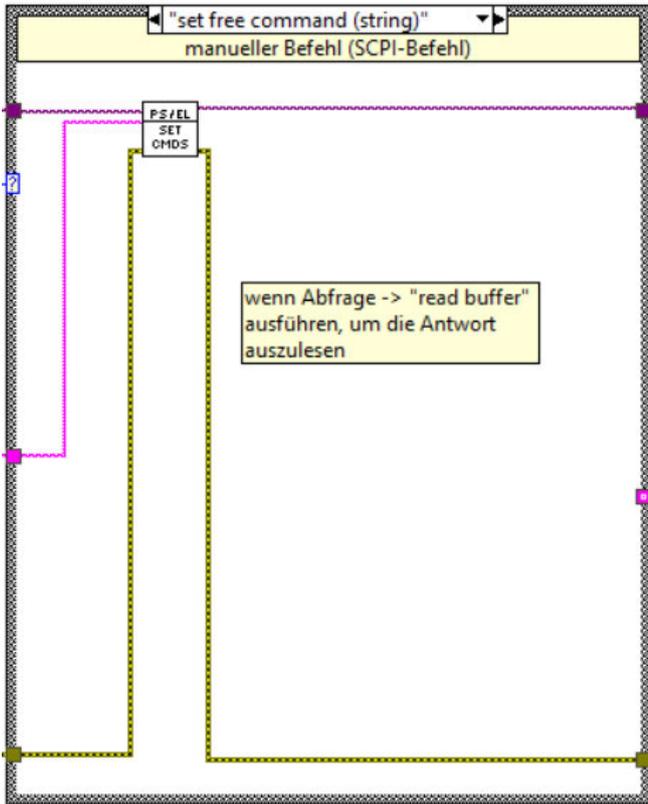


Abbildung B - 22: "set free command (string)"

# Blockdiagramme der SubVIs

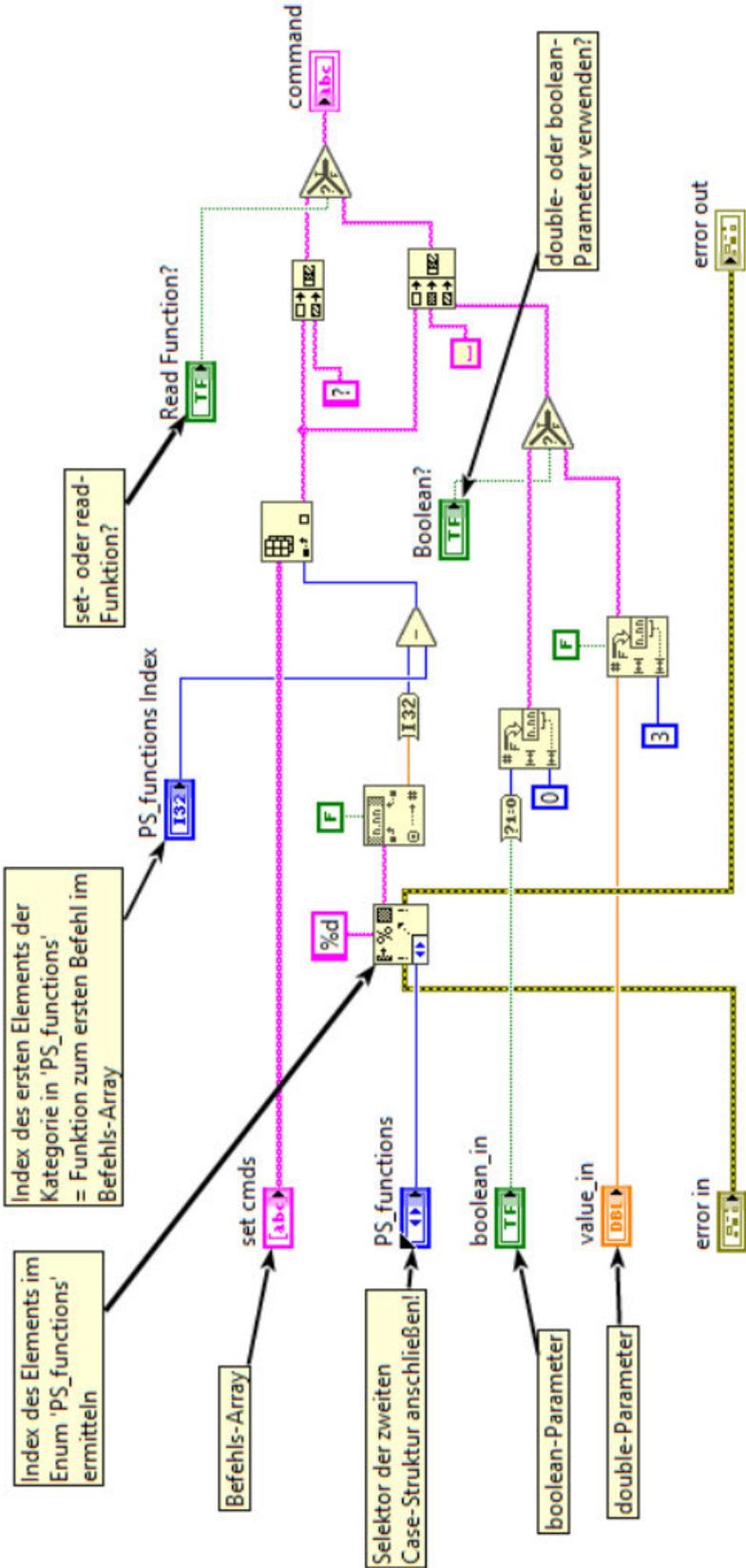


Abbildung B - 23: Block Diagram des SubVIs PS\_build\_cmd.vi

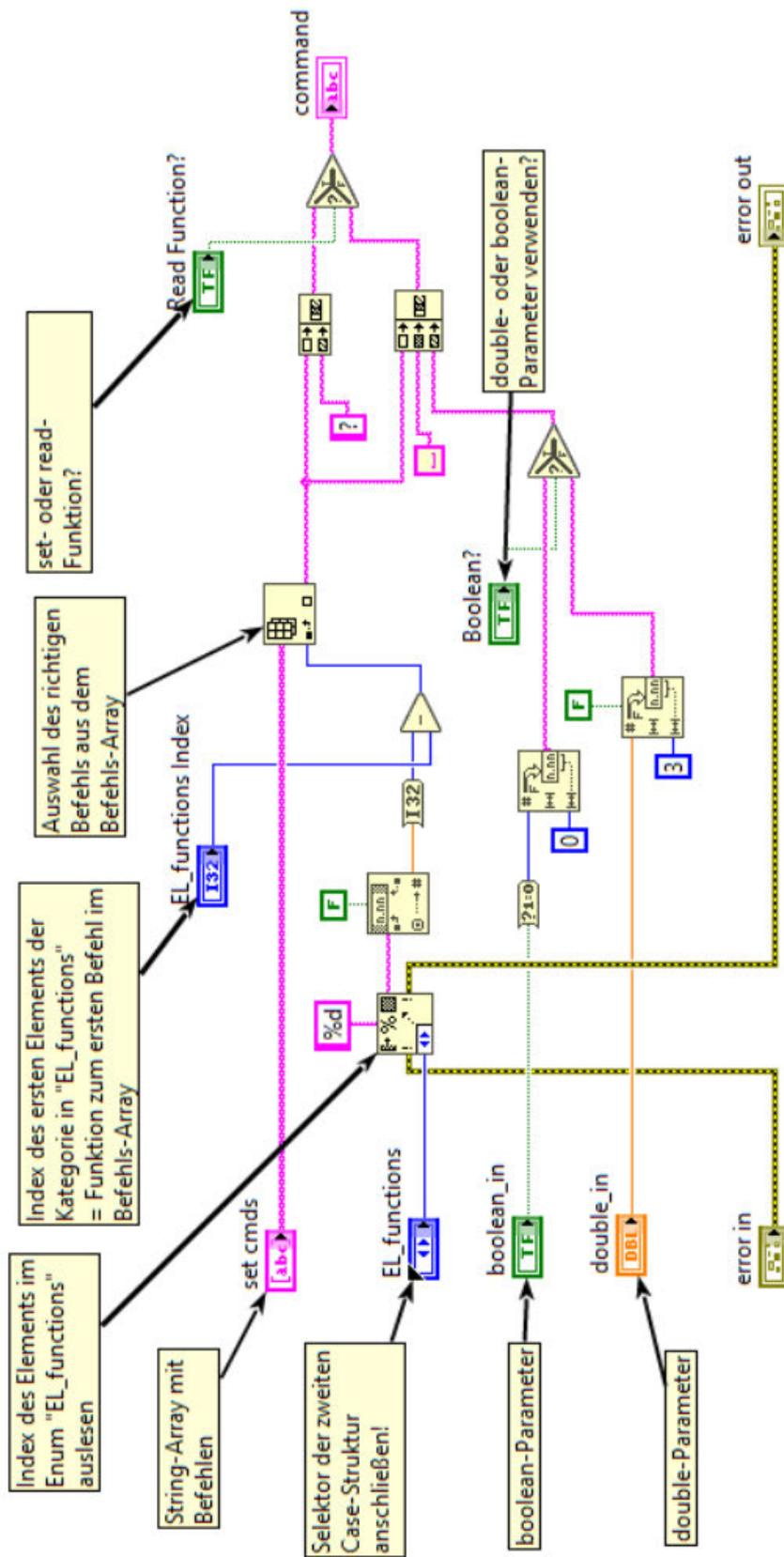


Abbildung B - 24: Block Diagram des SubVIs `EL_build_cmd.vi`

## C Anhang

In Tabelle C-1 sind die relevanten Messwerte der CC-Messreihe aus dem Experiment „Kombi-Betrieb“ (→ Kap. 5.2.1) dargestellt.

Test	VON (EL) [V]	Grenzwert	Messwerte					
		I (PS) [A]	I (PS) [A]	U (PS) [V]	P (PS) [W]	I (EL) [A]	U (EL) [V]	P (EL) [W]
0	ohne VON	2,0	2,000	0,437	0,874	1,988	0,223	0,444
		4,0	3,996	10,000	39,962	4,000	9,575	38,298
		6,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,576	38,299
		8,0	3,996	10,000	39,962	4,000	9,576	38,300
		10,0	3,996	10,000	39,962	4,000	9,576	38,301
1		2,0	2,000	0,437	0,874	1,988	0,223	0,443
		4,0	4,000	8,405	33,622	3,999	5,831	23,321
		6,0	3,996	9,999	39,958	4,000	9,576	38,300
		8,0	3,996	9,999	39,958	4,000	9,576	38,300
		10,0	3,996	9,999	39,958	4,000	9,576	38,301
2		2,0	2,000	0,437	0,874	1,988	0,223	0,443
		4,0	3,996	10,000	39,962	4,000	9,577	38,304
		6,0	3,996	10,000	39,962	4,000	9,577	38,304
		8,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,577	38,303
		10,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,577	38,303
3		2,0	2,000	0,439	0,879	1,987	0,223	0,443
		4,0	4,000	6,876	27,506	3,999	5,298	21,188
		6,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,576	38,302
		8,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,577	38,303
		10,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,577	38,303
4	0,1	2,0	2,000	0,255	0,509	2,001	0,045	0,090
		4,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,577	38,306
		6,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,578	38,307
		8,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,578	38,307
		10,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,578	38,307
5		2,0	2,000	0,255	0,509	2,001	0,045	0,090
		4,0	4,000	5,248	20,995	3,999	2,725	10,898
		6,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,577	38,306
		8,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,577	38,307
		10,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,577	38,309
6		2,0	2,000	0,255	0,509	2,001	0,045	0,090
		4,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,578	38,312
		6,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,578	38,310
		8,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,578	38,310
		10,0	3,998	10,000	39,975	4,000	9,578	38,310
7		2,0	2,000	0,255	0,509	2,001	0,045	0,090
		4,0	4,000	4,330	17,320	3,999	2,684	10,733
		6,0	3,998	9,999	39,971	4,000	9,578	38,312
		8,0	3,998	9,999	39,971	4,000	9,578	38,312
		10,0	3,998	9,999	39,971	4,000	9,578	38,313
4	2	2,0	2,000	0,253	0,505	2,001	0,044	0,089
		4,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,579	38,311
		6,0	3,998	10,000	39,975	4,000	9,579	38,313
		8,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,579	38,314
		10,0	3,998	10,000	39,975	4,000	9,580	38,316

5	2	2,0	2,000	0,254	0,507	2,001	0,045	0,089
		4,0	4,000	7,881	31,527	4,000	6,674	26,693
		6,0	3,998	10,000	39,975	4,000	9,580	38,316
		8,0	3,998	10,000	39,975	4,000	9,580	38,316
		10,0	3,998	9,999	39,971	4,000	9,580	38,317
6		2,0	2,000	0,253	0,505	2,001	0,045	0,089
		4,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,581	38,319
		6,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,581	38,319
		8,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,581	38,320
		10,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,581	38,320
7		2,0	2,000	0,254	0,507	2,001	0,045	0,089
		4,0	4,000	4,418	17,675	3,999	2,335	9,340
		6,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,581	38,321
		8,0	3,998	10,000	39,975	4,000	9,580	38,318
		10,0	3,998	9,999	39,971	4,000	9,580	38,318
0	ohne VON	3,0	3,000	0,413	1,240	3,025	0,197	0,596
		3,5	3,501	0,472	1,653	3,537	0,224	0,792
		4,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843
		4,5	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843
		5,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843
1		3,0	3,000	0,413	1,240	3,025	0,197	0,597
		3,5	3,501	0,473	1,656	3,537	0,223	0,788
		4,0	4,000	7,713	30,855	3,999	5,874	23,494
		4,5	3,996	9,999	39,958	4,000	9,711	38,842
		5,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,711	38,841
2		3,0	3,000	0,414	1,243	3,025	0,198	0,598
		3,5	3,501	0,473	1,656	3,537	0,224	0,792
		4,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843
		4,5	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843
		5,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843
3	3,0	3,000	0,412	1,237	3,024	0,197	0,597	
	3,5	3,501	0,471	1,649	3,537	0,225	0,794	
	4,0	4,000	6,864	27,457	3,999	4,452	17,806	
	4,5	3,997	9,999	39,965	4,000	9,711	38,841	
	5,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,711	38,841	
4	3,0	3,000	0,282	0,847	3,001	0,067	0,200	
	3,5	3,501	0,330	1,155	3,502	0,078	0,273	
	4,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843	
	4,5	3,997	9,999	39,965	4,000	9,712	38,843	
	5,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843	
5	3,0	3,000	0,282	0,847	3,001	0,067	0,201	
	3,5	3,501	0,330	1,155	3,502	0,078	0,273	
	4,0	4,000	5,909	23,638	3,999	3,634	14,534	
	4,5	3,997	9,999	39,965	4,000	9,711	38,841	
	5,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,711	38,841	
6	3,0	3,000	0,282	0,847	3,001	0,067	0,201	
	3,5	3,501	0,330	1,155	3,502	0,078	0,273	
	4,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843	
	4,5	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843	
	5,0	3,997	10,000	39,969	4,000	9,712	38,843	
7	3,0	3,000	0,282	0,847	3,001	0,067	0,201	
	3,5	3,501	0,330	1,155	3,502	0,078	0,273	
	4,0	4,000	5,256	21,028	3,999	3,554	14,214	
	4,5	3,997	10,000	39,969	4,000	9,711	38,842	
	5,0	3,997	9,999	39,965	4,000	9,711	38,841	

Tabelle C - 1: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CC-Messreihe

In Tabelle C-2 sind die relevanten Messwerte der CV-Messreihe aus dem Experiment „Kombi-Betrieb“ (→ Kap. 5.2.2) dargestellt.

Test	Grenzwert	Messwerte					
	U (PS)	I (PS)	U (PS)	P (PS)	I (EL)	U (EL)	P (EL)
	[V]	[A]	[V]	[W]	[A]	[V]	[W]
0	4,0	0,000	4,000	0,000	0,000	4,002	0,000
	6,0	0,044	6,000	0,265	0,043	5,998	0,259
	8,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,004
	10,0	3,000	6,212	18,635	3,001	5,999	18,004
	12,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,002
1	4,0	0,000	4,000	0,000	0,000	4,002	0,000
	6,0	0,040	6,000	0,241	0,021	6,000	0,124
	8,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,004
	10,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,004
	12,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,004
2	4,0	0,000	4,000	0,000	0,000	4,002	0,000
	6,0	0,043	6,000	0,257	0,044	5,998	0,261
	8,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,004
	10,0	3,000	6,212	18,635	3,001	5,999	18,002
	12,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,002
3	4,0	0,000	4,000	0,000	0,000	4,002	0,000
	6,0	0,041	6,000	0,243	0,041	5,999	0,249
	8,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,004
	10,0	3,000	6,211	18,632	3,001	5,999	18,001
	12,0	3,000	6,212	18,635	3,001	5,999	18,001
0	6,0	0,006	6,000	0,033	0,000	6,000	0,000
	6,1	1,397	6,099	8,520	1,398	6,000	8,385
	6,2	2,802	6,201	17,374	2,803	6,000	16,817
	6,3	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,008
	6,4	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,008
	6,5	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,007
	6,6	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,007
	6,7	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,007
	6,8	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,007
	6,9	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,007
	7,0	3,000	6,214	18,641	3,001	6,000	18,007
	7,1	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,005
	7,2	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,005
	7,3	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,007
	7,4	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,008
	7,5	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,007
	7,6	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,007
	7,7	3,000	6,214	18,641	3,001	6,000	18,007
	7,8	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,005
	7,9	3,000	6,214	18,641	3,001	6,000	18,007
8,0	3,000	6,215	18,644	3,001	6,000	18,005	
8,1	3,000	6,214	18,641	3,001	6,000	18,005	
8,2	3,000	6,214	18,641	3,001	6,000	18,005	

Tabelle C - 2: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CV-Messreihe

In Tabelle C-3 sind die relevanten Messwerte der CW-Messreihe (Variante 1) aus dem Experiment „Kombi-Betrieb“ (→ Kap. 5.2.3) dargestellt.

Test	VON (EL) [V]	Grenzwert	Messwerte					
		U (PS) [V]	I (PS) [A]	U (PS) [V]	P (PS) [W]	I (EL) [A]	U (EL) [V]	P (EL) [W]
0	ohne VON	2,000	2,469	1,821	4,496	2,472	1,645	4,067
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,075	3,853	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,008	8,000	8,067	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,803	10,000	8,033	0,803	9,944	7,982
1		2,000	2,477	1,822	4,511	2,476	1,644	4,070
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,075	3,853	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		8,000	1,008	8,000	8,067	1,008	7,928	7,992
		10,000	0,803	10,000	8,033	0,803	9,944	7,984
2		2,000	2,467	1,822	4,493	2,469	1,645	4,061
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,853	7,993
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,008	8,000	8,067	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,982
3		2,000	2,482	1,825	4,529	2,470	1,645	4,064
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,075	3,853	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		8,000	1,008	8,000	8,067	1,008	7,928	7,992
		10,000	0,803	10,000	8,033	0,803	9,944	7,982
4	0,1	2,000	0,000	2,001	0,000	0,000	2,001	0,000
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,008	8,000	8,067	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,982
5		2,000	0,000	2,001	0,000	0,000	2,001	0,000
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,075	3,853	7,994
		6,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,928	7,992
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,943	7,984
6		2,000	0,000	2,001	0,000	0,000	2,002	0,000
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,982
7		2,000	0,000	2,001	0,000	0,000	2,001	0,000
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,075	3,853	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,928	7,992
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,982
4	0,5	2,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,985
5		2,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,069	0,206
		4,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		6,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		8,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		10,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
4	1	2,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205

		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,008	8,000	8,067	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,982
5		2,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		4,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		6,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,928	7,992
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,984
4	1,5	2,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,985
5		2,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,853	7,993
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,994
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,984
4	2	2,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		4,000	2,074	4,000	8,294	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,008	8,000	8,067	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,803	10,000	8,033	0,803	9,944	7,985
5		2,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,008	8,000	8,067	1,008	7,928	7,992
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,982
4	2,5	2,000	0,000	2,001	0,000	0,000	2,001	0,000
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,944	7,982
5		2,000	0,000	2,001	0,000	0,000	2,001	0,000
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,943	7,981
4	3	2,000	0,000	2,000	0,000	0,000	2,001	0,000
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,803	10,000	8,033	0,803	9,944	7,985
5		2,000	0,000	2,001	0,000	0,000	2,001	0,000
		4,000	2,074	4,000	8,294	2,074	3,854	7,994
		6,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		8,000	1,009	8,000	8,072	1,008	7,929	7,993
		10,000	0,804	10,000	8,039	0,803	9,943	7,981
0	ohne VON	2,000	2,475	1,824	4,513	2,467	1,642	4,050
		2,500	2,547	2,309	5,882	2,572	2,122	5,458
		3,000	2,858	3,000	8,574	2,860	2,795	7,994
		3,500	2,401	3,500	8,403	2,402	3,328	7,994
		4,000	2,074	4,000	8,297	2,076	3,852	7,994

1	ohne VON	2,000	2,469	1,822	4,497	2,478	1,640	4,065
		2,500	2,560	2,304	5,899	2,561	2,123	5,438
		3,000	2,859	2,999	8,573	2,861	2,794	7,994
		3,500	2,401	3,499	8,400	2,402	3,328	7,994
		4,000	2,075	4,000	8,299	2,076	3,851	7,994
2		2,000	2,470	1,820	4,494	2,476	1,641	4,063
		2,500	2,558	2,306	5,900	2,572	2,121	5,455
		3,000	2,859	3,000	8,576	2,860	2,795	7,994
		3,500	2,401	3,500	8,405	2,402	3,328	7,994
		4,000	2,075	4,000	8,299	2,076	3,851	7,993
3		2,000	2,475	1,823	4,510	2,470	1,643	4,059
		2,500	2,570	2,306	5,927	2,558	2,128	5,444
		3,000	2,859	3,000	8,576	2,860	2,794	7,993
		3,500	2,401	3,500	8,405	2,402	3,328	7,994
		4,000	2,075	4,000	8,299	2,076	3,851	7,994

Tabelle C - 3: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CW-Messreihe (Variante 1)

In Tabelle C-4 sind die relevanten Messwerte aus der CW-Messreihe (Variante 2) des Experiments „Kombi-Betrieb“ (→ Kap. 5.2.3) dargestellt.

Test	VON (EL) [V]	Grenzwert	Messwerte					
		I (PS)	I (PS)	U (PS)	P (PS)	I (EL)	U (EL)	P (EL)
		[A]	[A]	[V]	[W]	[A]	[V]	[W]
0	ohne VON	1,000	1,001	0,537	0,538	0,989	0,455	0,450
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		4,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		5,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
1		1,000	1,001	0,544	0,545	0,989	0,454	0,449
		2,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992
		4,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992
		5,000	5,000	0,467	2,335	5,003	0,112	0,562
2		1,000	1,001	0,534	0,535	0,989	0,453	0,448
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		4,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
		5,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
3	1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024	
	2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993	
	3,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992	
	4,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992	
	5,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992	
4	0,1	1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		4,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		5,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
5		1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		2,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		4,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		5,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
6		1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		4,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993

		5,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
7		1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		2,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		4,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		5,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
6	1	1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		4,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		5,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
7		1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		2,000	2,000	0,187	0,373	2,001	0,046	0,092
		3,000	3,000	0,280	0,841	3,001	0,068	0,205
		4,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,992
		5,000	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
6	3	1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		4,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		5,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
7		1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		3,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		4,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		5,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
0	ohne VON	1,000	1,001	0,531	0,532	0,990	0,454	0,450
		1,100	1,100	0,601	0,661	1,092	0,492	0,537
		1,200	1,200	0,637	0,765	1,193	0,548	0,654
		1,300	1,302	0,702	0,914	1,296	0,602	0,781
		1,400	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,500	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,993
		1,600	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,993
		1,700	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,800	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,900	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,993
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
1		1,000	1,001	0,536	0,537	0,989	0,455	0,450
		1,100	1,101	0,596	0,656	1,090	0,497	0,542
		1,200	1,200	0,638	0,766	1,192	0,539	0,643
		1,300	1,302	0,667	0,868	1,297	0,593	0,769
		1,400	1,401	0,821	1,150	1,398	0,674	0,942
		1,500	1,501	0,893	1,340	1,498	0,775	1,160
		1,600	1,601	1,003	1,606	1,598	0,931	1,488
		1,700	1,700	1,202	2,043	1,698	1,070	1,816
		1,800	1,801	1,473	2,654	1,800	1,289	2,321
		1,900	1,901	1,914	3,638	1,899	1,784	3,389
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,903	7,992
4	0,1	1,000	1,001	0,095	0,095	1,001	0,024	0,024
		1,100	1,100	0,104	0,115	1,101	0,026	0,029
		1,200	1,200	0,113	0,136	1,201	0,028	0,034
		1,300	1,302	0,123	0,160	1,301	0,030	0,039
		1,400	1,355	6,000	8,127	1,354	5,903	7,992
		1,500	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,600	1,355	6,000	8,127	1,354	5,904	7,993
		1,700	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,800	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,900	1,355	6,000	8,127	1,354	5,903	7,992

5		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,000	1,001	0,095	0,095	1,001	0,024	0,024
		1,100	1,101	0,104	0,115	1,101	0,026	0,029
		1,200	1,200	0,113	0,136	1,201	0,028	0,034
		1,300	1,302	0,123	0,160	1,301	0,030	0,039
		1,400	1,401	0,132	0,185	1,401	0,033	0,046
		1,500	1,501	0,141	0,212	1,501	0,035	0,052
		1,600	1,601	0,151	0,241	1,601	0,037	0,059
		1,700	1,700	0,160	0,272	1,701	0,039	0,066
		1,800	1,801	0,170	0,306	1,802	0,042	0,075
		1,900	1,901	0,179	0,341	1,901	0,044	0,083
2,000	2,000	0,189	0,377	2,001	0,046	0,091		
4	1	1,000	1,001	0,095	0,095	1,001	0,024	0,024
		1,100	1,101	0,104	0,115	1,101	0,026	0,029
		1,200	1,200	0,113	0,136	1,201	0,028	0,034
		1,300	1,302	0,123	0,160	1,301	0,030	0,039
		1,400	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,500	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,600	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,700	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,800	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		1,900	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,993
5		1,000	1,001	0,095	0,095	1,001	0,024	0,024
		1,100	1,101	0,104	0,115	1,100	0,026	0,029
		1,200	1,200	0,113	0,136	1,200	0,028	0,034
		1,300	1,302	0,123	0,160	1,301	0,030	0,039
		1,400	1,401	0,132	0,185	1,401	0,033	0,046
		1,500	1,501	0,141	0,212	1,501	0,035	0,052
		1,600	1,600	0,151	0,241	1,601	0,037	0,059
		1,700	1,700	0,160	0,272	1,701	0,040	0,067
		1,800	1,801	0,169	0,305	1,802	0,042	0,075
		1,900	1,901	0,178	0,339	1,901	0,044	0,083
		2,000	2,000	0,188	0,375	2,001	0,046	0,092
4	3	1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		1,100	1,100	0,103	0,113	1,100	0,026	0,029
		1,200	1,200	0,112	0,135	1,200	0,028	0,034
		1,300	1,302	0,122	0,158	1,301	0,030	0,039
		1,400	1,353	6,000	8,119	1,354	5,905	7,993
		1,500	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		1,600	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		1,700	1,355	6,000	8,127	1,354	5,905	7,993
		1,800	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		1,900	1,354	6,000	8,123	1,354	5,905	7,993
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
5		1,000	1,001	0,094	0,094	1,001	0,024	0,024
		1,100	1,100	0,103	0,113	1,100	0,026	0,029
		1,200	1,200	0,112	0,135	1,200	0,028	0,034
		1,300	1,302	0,122	0,158	1,301	0,030	0,039
		1,400	1,401	0,131	0,183	1,401	0,032	0,045
		1,500	1,501	0,140	0,210	1,501	0,035	0,052
		1,600	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		1,700	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		1,800	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		1,900	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992
		2,000	1,354	6,000	8,123	1,354	5,904	7,992

Tabelle C - 4: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CW-Messreihe (Variante 2)

In Tabelle C-5 sind die relevanten Messwerte aus der CR-Messreihe (Variante 1) des Experiments „Kombi-Betrieb“ (→ Kap. 5.2.4) dargestellt.

Test	VON (EL) [V]	Grenzwert	Messwerte					
		U (PS) [V]	I (PS) [A]	U (PS) [V]	P (PS) [W]	I (EL) [A]	U (EL) [V]	P (EL) [W]
0	ohne VON	4,000	0,659	4,000	2,636	0,658	3,956	2,603
		8,000	1,317	8,000	10,538	1,317	7,908	10,412
		12,000	1,976	11,999	23,707	1,975	11,862	23,434
		16,000	2,634	15,999	42,142	2,634	15,815	41,661
		20,000	3,292	19,999	65,844	3,293	19,768	65,104
1		4,000	0,659	4,000	2,636	0,658	3,956	2,604
		8,000	1,317	8,000	10,538	1,317	7,908	10,412
		12,000	1,975	11,999	23,699	1,975	11,861	23,432
		16,000	2,634	15,998	42,139	2,634	15,814	41,659
		20,000	3,292	19,998	65,840	3,293	19,767	65,098
2		4,000	0,659	4,000	2,636	0,658	3,956	2,604
		8,000	1,317	8,000	10,533	1,317	7,908	10,412
		12,000	1,976	11,999	23,707	1,975	11,862	23,433
		16,000	2,634	15,999	42,142	2,634	15,815	41,661
		20,000	3,292	19,999	65,844	3,293	19,768	65,106
3		4,000	0,659	4,000	2,636	0,658	3,956	2,603
		8,000	1,317	8,000	10,538	1,317	7,908	10,412
		12,000	1,975	11,999	23,699	1,975	11,861	23,429
		16,000	2,633	15,999	42,132	2,634	15,814	41,660
		20,000	3,292	19,998	65,827	3,293	19,767	65,096
4	0,1	4,000	0,660	4,000	2,638	0,658	3,956	2,603
		8,000	1,317	8,000	10,533	1,317	7,908	10,412
		12,000	1,975	11,999	23,699	1,975	11,862	23,434
		16,000	2,633	15,999	42,132	2,634	15,815	41,661
		20,000	3,292	19,999	65,844	3,293	19,768	65,106
5		4,000	0,659	4,000	2,636	0,658	3,956	2,603
		8,000	1,317	8,000	10,533	1,317	7,908	10,412
		12,000	1,975	11,999	23,699	1,975	11,861	23,432
		16,000	2,633	15,998	42,129	2,634	15,814	41,660
		20,000	3,292	19,998	65,827	3,293	19,767	65,098
6		4,000	0,659	4,000	2,636	0,658	3,956	2,603
		8,000	1,317	8,000	10,533	1,317	7,908	10,412
		12,000	1,976	11,999	23,707	1,975	11,862	23,434
		16,000	2,634	15,999	42,142	2,634	15,815	41,661
		20,000	3,292	19,999	65,844	3,293	19,768	65,101
7		4,000	0,659	4,000	2,636	0,658	3,956	2,603
		8,000	1,317	8,000	10,533	1,317	7,908	10,412
		12,000	1,975	11,999	23,699	1,975	11,862	23,433
		16,000	2,633	15,999	42,132	2,634	15,814	41,660
		20,000	3,292	19,998	65,827	3,293	19,767	65,096

Tabelle C - 5: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CR-Messreihe (Variante 1)

In Tabelle C-6 sind die relevanten Messwerte aus der CR-Messreihe (Variante 2) des Experiments „Kombi-Betrieb“ (→ Kap. 5.2.4) dargestellt.

Test	VON (EL) [V]	Grenzwert	Messwerte						
		U (PS) [V]	I (PS) [A]	U (PS) [V]	P (PS) [W]	I (EL) [A]	U (EL) [V]	P (EL) [W]	
0	ohne VON	2,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,885	16,273	
		3,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,276	
		4,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274	
		5,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274	
		6,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274	
1		2,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,885	16,273	
		3,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,885	16,273	
		4,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,885	16,273	
		5,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,885	16,273	
		6,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,885	16,273	
2		2,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
		3,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
		4,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
		5,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274	
		6,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274	
3		2,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
		3,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
		4,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
		5,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,885	16,273	
		6,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
4		0,1	2,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274
			3,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274
			4,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274
			5,000	1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274
			6,000	1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274
5	2,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	3,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	4,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,885	16,273	
	5,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,885	16,273	
	6,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
6	2,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	3,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	4,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	5,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	6,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
7	2,000		1,646	10,000	16,458	1,646	9,886	16,274	
	3,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	4,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	5,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
	6,000		1,646	10,000	16,464	1,646	9,886	16,274	
0	ohne VON		1,000	1,001	6,078	6,085	1,001	6,010	6,014
			2,000	1,975	11,999	23,699	1,976	11,863	23,442
			3,000	1,976	11,999	23,707	1,976	11,863	23,442
			4,000	1,976	11,999	23,707	1,976	11,863	23,442
			5,000	1,976	11,999	23,707	1,976	11,863	23,442

Tabelle C - 6: Messwerte aus dem Experiment "Kombi-Betrieb", CR-Messreihe (Variante 2)

In Tabelle C-7 sind die relevanten Messwerte der Wartezeitmessungen Variante 1 (→ Kap. 5.3) dargestellt.

variable Wartezeit [ms]	I_PS [A]	U_PS [V]	P_PS [W]	I_EL [A]	U_EL [V]	P_EL [W]
1000	4,000	0,370	1,481	4,003	0,090	0,359
1000	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
1000	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
1000	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
1000	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
1000	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
1000	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
1000	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
1000	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
1000	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
900	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
900	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
900	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,989
900	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
900	1,743	7,000	12,197	1,743	6,878	11,990
900	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
900	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
900	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
900	1,743	7,000	12,197	1,743	6,878	11,989
900	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
800	1,743	7,000	12,197	1,743	6,878	11,990
800	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
800	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
800	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
800	1,743	7,000	12,197	1,743	6,878	11,990
800	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
800	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
800	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
800	1,743	7,000	12,197	1,743	6,878	11,990
800	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
700	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
700	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
700	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,989
700	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
700	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
700	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
700	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
700	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
700	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,989
700	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
600	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
600	1,699	6,000	10,192	1,699	5,903	10,027
600	1,743	7,000	12,202	1,743	6,896	12,022
600	1,699	6,000	10,192	1,699	5,895	10,014
600	1,743	7,000	12,202	1,743	6,888	12,008
600	1,699	6,000	10,192	1,699	5,889	10,004
600	1,743	7,000	12,202	1,743	6,881	11,996
600	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
600	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
600	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
500	1,743	7,000	12,202	1,306	6,878	8,980
500	1,699	6,000	10,192	1,699	5,881	9,990
500	1,743	7,000	12,202	1,743	6,907	12,041

500	1,699	6,000	10,192	1,302	5,881	7,657
500	1,743	7,000	12,202	1,743	6,878	11,990
500	1,699	6,000	10,192	1,699	5,909	10,038
500	1,743	7,000	12,202	1,343	6,878	9,234
500	1,698	6,000	10,188	1,699	5,881	9,990
500	1,743	7,000	12,197	1,743	6,906	12,040
500	1,698	6,000	10,188	1,292	5,881	7,601
400	1,743	7,000	12,202	1,743	6,951	12,118
400	1,699	6,000	10,192	1,231	5,881	7,241
400	1,743	7,000	12,202	0,630	6,916	4,358
400	1,699	6,000	10,192	1,685	5,962	10,046
400	1,743	7,000	12,202	1,070	6,886	7,366
400	1,698	6,000	10,188	0,411	5,932	2,441
400	1,743	7,000	12,197	1,537	6,878	10,569
400	1,698	6,000	10,188	0,895	5,899	5,277
400	1,743	7,000	12,202	1,743	6,942	12,102
400	1,699	6,000	10,192	1,329	5,881	7,814
300	1,743	7,000	12,197	0,685	6,912	4,735
300	1,699	6,000	10,192	0,587	5,920	3,477
300	1,743	7,000	12,202	0,463	6,928	3,209
300	1,699	6,000	10,192	0,344	5,937	2,044
300	1,743	7,000	12,197	0,251	6,943	1,741
300	1,699	6,000	10,192	0,127	5,952	0,753
300	1,743	7,000	12,202	0,000	6,961	0,000
300	1,698	6,000	10,188	0,000	5,969	0,000
300	1,743	7,000	12,202	1,490	6,978	10,400
300	1,699	6,000	10,192	1,356	5,985	8,116
200	1,743	7,000	12,197	0,000	6,999	0,000
200	1,699	6,000	10,192	0,000	5,968	0,000
200	1,743	7,000	12,202	0,339	6,937	2,349
200	1,699	6,000	10,192	0,724	5,999	4,342
200	1,743	7,000	12,202	0,000	6,999	0,000
200	1,698	6,000	10,188	0,000	5,974	0,000
200	1,743	7,000	12,202	0,213	6,945	1,480
200	1,699	6,000	10,192	0,597	5,999	3,583
200	1,743	7,000	12,202	1,023	6,999	7,157
200	1,699	6,000	10,192	0,000	5,983	0,000
100	1,743	7,000	12,202	0,071	6,999	0,500
100	1,699	6,000	10,192	0,000	5,999	0,000
100	1,743	7,000	12,202	0,219	6,999	1,531
100	1,699	6,000	10,192	0,000	5,999	0,000
100	1,743	7,000	12,202	0,323	6,999	2,260
100	1,699	6,000	10,192	0,000	5,995	0,000
100	1,743	7,000	12,202	0,428	6,999	2,997
100	1,699	6,000	10,192	0,000	5,987	0,000
100	1,743	7,000	12,202	0,000	6,999	0,000
100	1,699	6,000	10,192	0,000	5,979	0,000
0	1,743	7,000	12,202	0,000	6,999	0,000
0	1,699	6,000	10,192	0,000	5,999	0,000
0	1,744	7,000	12,206	0,000	6,999	0,000
0	1,698	6,000	10,188	0,000	5,999	0,000
0	1,743	7,000	12,202	0,000	6,999	0,000
0	1,698	6,000	10,188	0,000	5,999	0,000
0	1,743	7,000	12,202	0,000	6,999	0,000
0	1,699	6,000	10,192	0,000	5,999	0,000
0	1,743	7,000	12,202	0,000	6,999	0,000
0	1,699	6,000	10,192	0,000	5,999	0,000

Tabelle C - 7: Messwerte aus den Wartezeitmessungen Variante 1

In Tabelle C-8 sind die relevanten Messwerte aus den Wartezeitmessungen Variante 2 (→ Kap. 5.4) dargestellt.

variable Wartezeit [ms]	I (PS) [A]	U (PS) [V]	P (PS) [W]	I (EL) [A]	U (EL) [V]	P (EL) [W]
100	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
100	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
100	1,744	7,000	12,206	1,744	6,873	11,990
100	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
100	1,744	7,000	12,206	1,744	6,873	11,990
100	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
100	1,743	7,000	12,202	1,744	6,874	11,991
100	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
100	1,744	7,000	12,206	1,744	6,874	11,991
100	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
90	1,744	7,000	12,206	1,744	6,874	11,991
90	1,699	6,000	10,196	1,700	5,876	9,990
90	1,744	7,000	12,206	1,745	6,874	11,992
90	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
90	1,743	7,000	12,202	1,745	6,873	11,991
90	1,699	6,000	10,192	1,700	5,877	9,991
90	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,990
90	1,699	6,000	10,192	1,700	5,877	9,991
90	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
90	1,699	6,000	10,192	1,700	5,877	9,991
80	1,743	7,000	12,202	1,744	6,874	11,991
80	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
80	1,744	7,000	12,206	1,744	6,874	11,991
80	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
80	1,744	7,000	12,206	1,744	6,874	11,991
80	1,699	6,000	10,196	1,700	5,876	9,990
80	1,744	7,000	12,206	1,744	6,874	11,991
80	1,699	6,000	10,192	1,700	5,876	9,990
80	1,743	7,000	12,202	1,745	6,874	11,992
80	1,699	6,000	10,192	1,700	5,877	9,992
70	1,743	7,000	12,202	1,745	6,874	11,992
70	1,699	6,000	10,192	1,700	5,877	9,992
70	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
70	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
70	1,743	7,000	12,202	1,745	6,874	11,992
70	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
70	1,744	7,000	12,206	1,744	6,874	11,989
70	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
70	1,744	7,000	12,206	1,744	6,873	11,988
70	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
60	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
60	1,699	6,000	10,192	1,700	5,877	9,992
60	1,744	7,000	12,206	1,744	6,873	11,988
60	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
60	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
60	1,699	6,000	10,192	1,700	5,877	9,992
60	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
60	1,699	6,000	10,192	1,700	5,877	9,992
60	1,743	7,000	12,202	1,744	6,874	11,989
60	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
50	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
50	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
50	1,743	7,000	12,202	1,745	6,874	11,992

50	1,699	6,000	10,196	1,700	5,876	9,990
50	1,743	7,000	12,202	1,744	6,874	11,991
50	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
50	1,743	7,000	12,202	1,744	6,874	11,991
50	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
50	1,743	7,000	12,202	1,744	6,874	11,990
50	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
40	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
40	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
40	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
40	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
40	1,743	7,000	12,202	1,745	6,874	11,992
40	1,699	6,000	10,196	1,700	5,876	9,990
40	1,743	7,000	12,202	1,744	6,874	11,991
40	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
40	1,743	7,000	12,202	1,744	6,874	11,991
40	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,993
30	1,743	7,000	12,202	1,744	6,872	11,988
30	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,991
30	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
30	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
30	1,743	7,000	12,202	1,744	6,873	11,988
30	1,699	6,000	10,196	1,700	5,877	9,992
30	1,743	7,000	12,202	1,745	6,873	11,991
30	1,699	6,000	10,196	1,700	5,876	9,990
30	1,744	7,000	12,206	1,744	6,874	11,991
30	1,699	6,000	10,192	1,700	5,876	9,990
20	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
20	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
20	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
20	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
20	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
20	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
20	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
20	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
20	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
20	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
20	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
20	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
10	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
10	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,205
10	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
10	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,205
10	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
10	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,205
10	4,000	0,378	1,514	4,003	0,091	0,363
10	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,205
10	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
10	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,205
0	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
0	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
0	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
0	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
0	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
0	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
0	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
0	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,203
0	4,000	0,378	1,514	4,003	0,090	0,361
0	3,000	0,284	0,850	3,001	0,068	0,205

Tabelle C - 8: Messwerte der Wartezeitmessungen Variante 2



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Anderßen

Vorname: Marieke Katharina

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Planung, Entwicklung und Testung der erforderlichen Schnittstellenprogramme für einen Hybridversuchsstand in LabVIEW

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

Datum

Unterschrift im Original