

Sachbericht (Schlussbericht)

zum Verwendungsnachweis

zu FuE Vorhaben

Reg.-Nr.:	MF100062
FuE-Einrichtung:	GFal e.V. Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. Volmer Straße 3 12489 Berlin
Titel:	Kommunikation komplexer, peripherer Sensorik mit Schweißmaschinen am Beispiel CAN-Bus gesteuerter Spektralregler (CANS)
Projektlaufzeit:	01.11.2010 bis 31.12.2012

Berlin, den 28. Feb. 2013

Name und Telefonnummer des Projektleiters: Dr. Gerd Heinz +49 (30) 814 563-490

Firmenstempel

Unterschrift des Projektleiters

rechtsverbindliche Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1. Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens	7
2. Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse	9
Entwicklungen im Überblick	9
Hardwareentwicklungen	9
Softwareentwicklungen	9
Meß- und Prüfmittel	9
Systemkonzept und Busschnittstellen	9
RS485-Übertragung	10
Spektralregler Ion	12
USB-Adapter	14
Ethernet-Adapter	14
ABIC-Interface (CAN, Profibus)	15
Zusammenfassung	17
Softwareentwicklungen	19
Systemkonzept	19
Kommunikationsstrukturen zwischen ionOS und Lion	20
Spektralregler-Betriebssystem ionOS	23
Windows-Kommunikation mit Lion (USB)	25
Erprobung des Verfahrens	27
Meß- und Prüfmittel	27
Regler	28
Experimentierset ION	33
3. Bewertung der erzielten Ergebnisse in Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen	34
4. Darstellung der Innovationspotentiale und Applikationsmöglichkeiten	36
Darlegung der Ergebnisverwertung	37
5. Angaben zu erworbenen bzw. angemeldeten Schutzrechten für Vorhabensergebnisse	38
6. Zusammenstellung aller erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen	39
7. Danksagung	41

Zusammenfassung

Nach Erhalt des Abicor-Innovationspreises 2007 für das Verfahren der spektralen Regelung von Schweißprozessen und nach weiteren Erfolgen und Rückschlägen bot dieses Projekt die Gelegenheit, intensiv an industrietauglichen Systemkonzepten und Ausformungen für die Vision von spektral geregelten, digitalen (d.h. von einem Mikrocontroller gesteuerten) Pulsschweißreglern zu arbeiten.

Gegenüber herkömmlichen Schweißprozessen werden hierbei aus der spektralen Zusammensetzung des Lichts physikalische Eigenschaften (Teilchentemperaturen) ermittelt, die zur Prozeßoptimierung genutzt werden können.

Es gelang, ein praxistaugliches Systemkonzept spektraler Regler für Pulsschweißmaschinen in Hard- und Software zu entwickeln und vorzustellen, welches die finale Abschlußprüfung und Enderprobung am 21.2.2013 ohne einen einzigen Systemabsturz – weder des Spektralreglers noch der Windows-Software bestand.

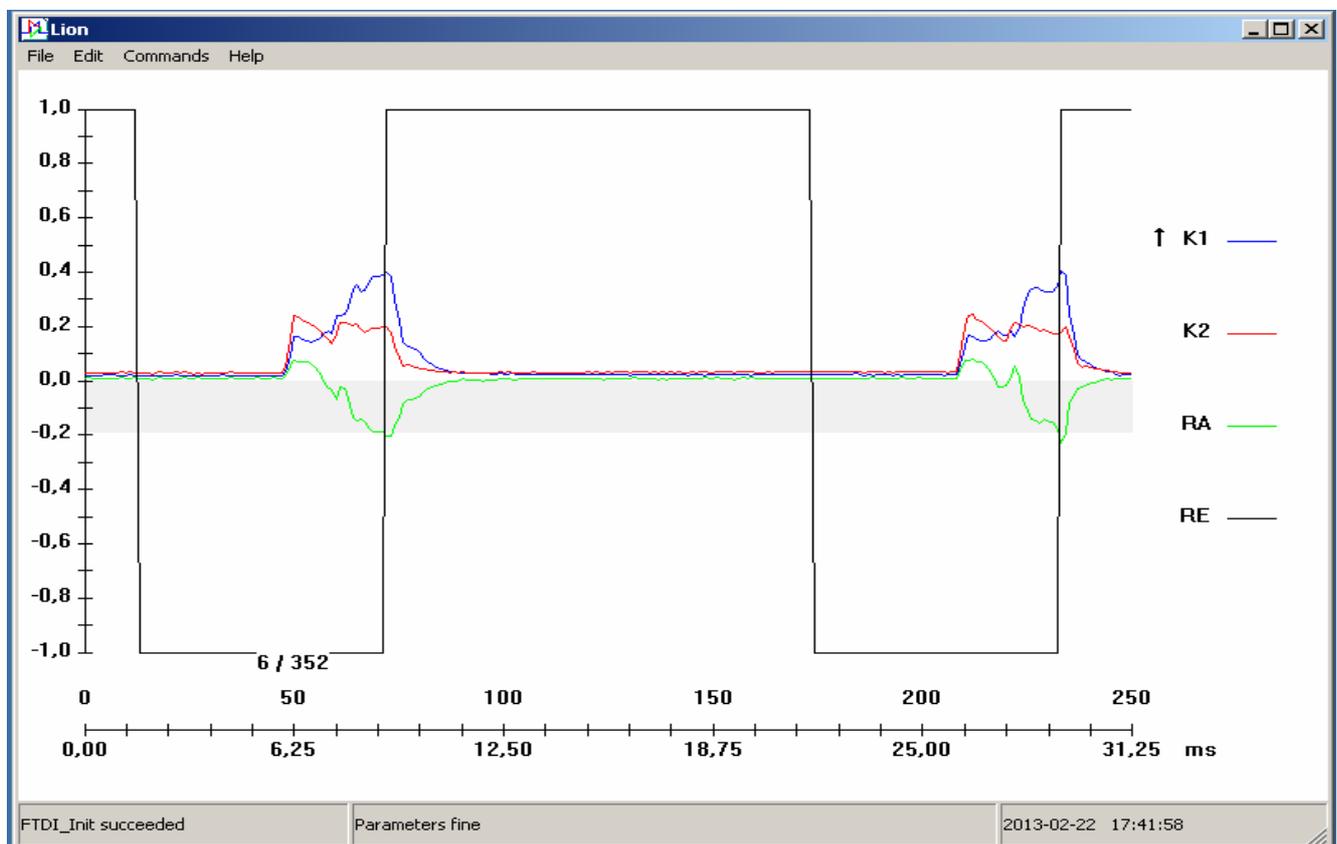


Abb. 1: Erster Pulsschweißprozeß, der von einem digitalen Spektralregler gesteuert wird. Die Windows-Software Lion gestattet es, Zeitfunktionen mitszuschneiden. Aufnahme vom 21.2.2013 mit Cloos-Quinto GLC403

Damit steht mit Projektende erstmals eine Entwicklungsumgebung zur Verfügung, welche mit Abtastraten etwa zwischen 8 und 48 kHz zur Echtzeitbearbeitung und -kontrolle verschiedenartiger Fügeprozesse herangezogen werden kann.

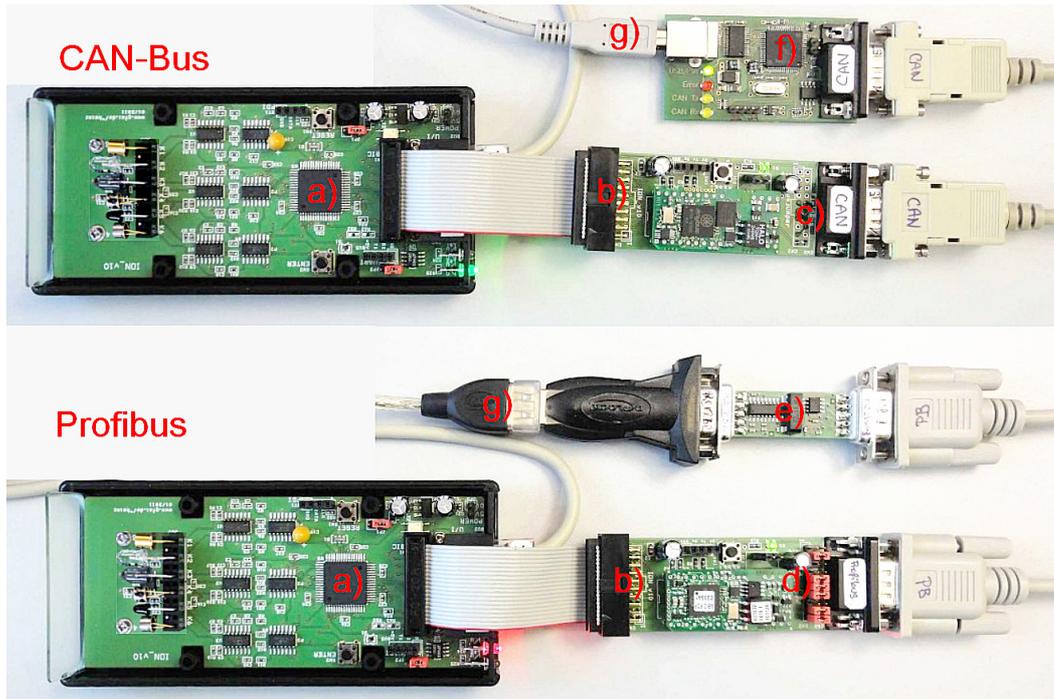


Abb. 2: Im Projekt entstandene Hardwarekomponenten:
CAN-Bus: a) Spektralregler Ion; b) ABIC-Adapter, c) CAN-Schnittstelle, f) CAN-Busmaster, g) Master-USB-Anschluß
Profibus: a) Spektralregler Ion, b) ABIC-Adapter, d) PB-Schnittstelle, e) Busmaster, g) Master-USB-Anschluß

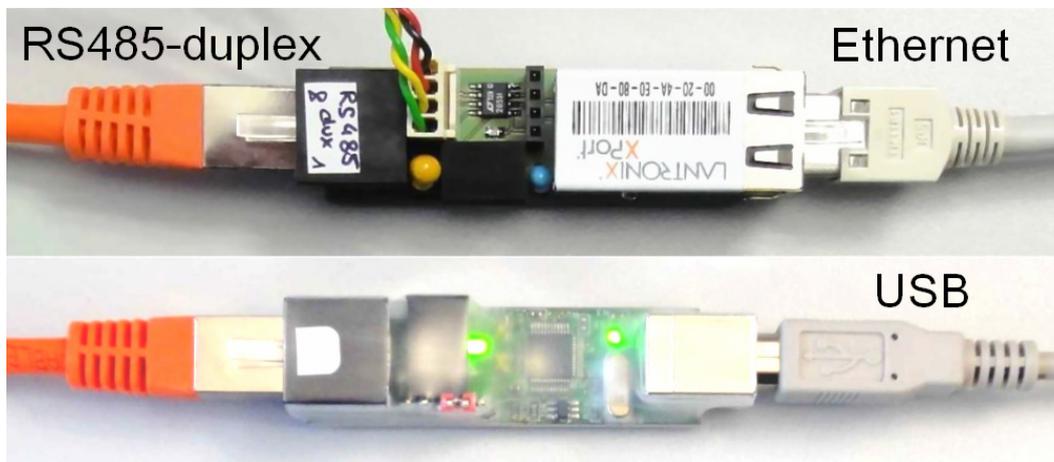


Abb. 3: Schnelle, isolierte RS485 Schnittstellenkonverter für Ethernet und USB:
RS485-duplex-Interfaces mit Bypass-Funktion

Besonderheit des entwickelten Systems ist eine permanente und parallele Abarbeitung des Schweißprogramms (weld) und der Übertragung (record) aufgenommener Zeitfunktionen an einen PC.

Eine zentrale Prämisse der Entwicklung bestand darin, daß die Kommunikation mit dem Anwender in keiner Weise den Schweißprozeß behindern oder stören darf. Obwohl der

Sensor permanent schweißt, muß er parallel und ohne Schweißstörung in Echtzeit mehrere Zeitfunktionen (zur Zeit 13) an den PC weiterleiten, sodaß eine stete Prozeßüberwachung möglich ist.

Mit Projektabschluß steht ein Entwicklungskit zum Spektralregler (Ion) zur Verfügung, in welchem die Regelstrecke per Software definierbar ist. Einstellungen an Regelgrößen können komfortabel über eine PC-Software (Lion) und USB vorgenommen werden. In Echtzeit kann der Regelprozeß beobachtet und justiert werden.

Mit dem Projektergebnis wurde ein Meilenstein auf dem Wege hin zu spektral geregelten Schweißmaschinen gelegt. Die Projektzielstellungen wurden erreicht, die Projektarbeiten wurden entsprechend Arbeitsplan abgeschlossen.

1. Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Einführung intelligenter, spektraler Sensoren und Regler für Schweißgeräte (WIG, MIG, Laser) durch:

- Schaffung eines Hardwaregerüsts eines universellen Spektralreglermoduls („Spektralregler“)
- Implementierung einer Kommunikationsschnittstelle zu modernen Schweißgeräten (CAN, Profibus, Ethernet, USB)
- Entwicklung einer ersten Applikation in Software

Deutsche (europäische) Schweißgerätehersteller zielen zunehmend auf Verfahren, mit denen spezifisch erhöhte Prozeßqualitäten insbesondere beim Roboterschweißen realisiert werden können. Solche Verfahren bedingen die Interaktion mit spezifischen, intelligenten Sensoren.

So geben Lagesensoren die Möglichkeit, die Bahn des Brenners zu überwachen. Naht- oder Badsensoren gestatten höhere Präzision der Schweißnaht. Gasdüsensensoren prüfen den Abstand vom Werkstück im Prozeß. Lichtbogensensoren zentrieren die Bahnführung. Lasersensoren gestatten die Vorvermessung der Bahngeometrie. 3d-Bewegungssensoren gestatten die Überwachung des Brennervorschubes, wichtig bei legierten Stählen. Spektralsensoren gestatten eine Überwachung der Plasmatemperatur oder des Tropfenübergangs oder des Durchschweißens.

Die Entstehung komplexer, intelligenter Sensoren (siehe Literaturverzeichnis) wird begünstigt von der rasanten Miniaturisierung und Leistungsexplosion der Mikroelektronik. Embedded 32-Bit Prozessoren und DSP (eigentlich aus dem Mobilphone- Markt) sind derart leistungsstark geworden, daß sich komplexe, intelligente Sensoren, wie 3d-Lageregler oder Spektralregler in kleine Gehäusemodule am Brenner integrieren lassen.

Die Entwicklung spezifischer Sensormodule für Schweißmaschinen ist um so aufwendiger, je intelligenter der Sensor wird. Für kmU- Schweißgerätehersteller werden Eigenentwicklungen von Speziälsensoren deshalb mit steigender Komplexität zunehmend unrentabel.

Spektrale Regler haben mehrere Zeitfunktionen in Echtzeit bei Abtastraten um 100 kS/s zu analysieren und zu verarbeiten. In Spektralreglern mit integrierter Signalvorverarbeitung (32 Bit) steckt deshalb viel Know-how. Eigenentwicklungen von Schweißgeräteherstellern (i.a. kmU) sind zu aufwendig.

Andererseits sind keine standardisierten Kommunikationsschnittstellen in Gebrauch, die für verschiedene Hersteller gleichermaßen applizierbar wären, um solche Regler als Zubehör anbieten zu können. Je nach Applikation hat ein Hersteller verschiedene Schnittstellen zu bedienen. CANopen könnte eine Zielrichtung der Vereinheitlichung werden, aber auch Profibus hat (noch immer) Perspektiven.

Vergleichbar zu anderen, externen Baugruppen (Brenner, Gas, Draht) sollen mit dem Projekt komplexe Sensor-/Aktormodule, wie Spektralregler, an Schweißgeräte verschiedener Hersteller angeschlossen werden können.

Dazu ist zu untersuchen, welche Eigenschaften Kommunikationsschnittstellen in Hardware und Software aufweisen müssen, um bei europäischen Herstellern (Cloos, Rehm, EWM, Fronius, Abicor-Binzel, Kjellberg) Akzeptanz zu finden.

Ausgehend von einer Untersuchung von Anforderungen zu Businterfaces und Kommunikationsprotokollen ist ein für Maschinen verschiedener Schweißgerätehersteller portables Interface zu entwickeln, welches eine Parametrisierung eines Spektralsensors sowie eine Parameterübergabe an Bedienteil und Stromquelle der Schweißmaschine einschließt. Eine offene, vereinheitlichende Prozeßschnittstelle ist zu schaffen, die sich möglichst modular an bekannte Architekturen anlehnt, und die von verschiedenen Herstellern akzeptiert werden kann.

Die Untersuchung zielt insbesondere auf die Möglichkeiten der Applikation und Markteinführung verschiedener, spektraler Regler auf Liniengruppen mit Photodioden. Hier ist im Team ein Spezialwissen entstanden, welches Entwicklungen für verschiedene Aufgaben gestattet.

Es soll ein Modul geschaffen werden, mit dem verschiedene, spektrale Regelaufgaben per Software gelöst werden können und der an Schweißmaschinen der verschiedenen Hersteller anpaßbar ist.

Wesentlicher Schwerpunkt des Projekts ist es, in Zusammenarbeit mit der Schweißindustrie das neue Gebiet der „Spektralen Sensorik“ soweit voranzubringen, so, daß ein für die verschiedenen Firmen mit unterschiedlichen Interessen nutzbares Entwicklungskit verfügbar ist. Dieses Ziel wurde erreicht.



Abb. 4: Im Projekt entstandener 8-Kanal Spektralregler Ion – erster praktikabler, soft-gesteuerter Spektralregler für Pulsschweißmaschinen

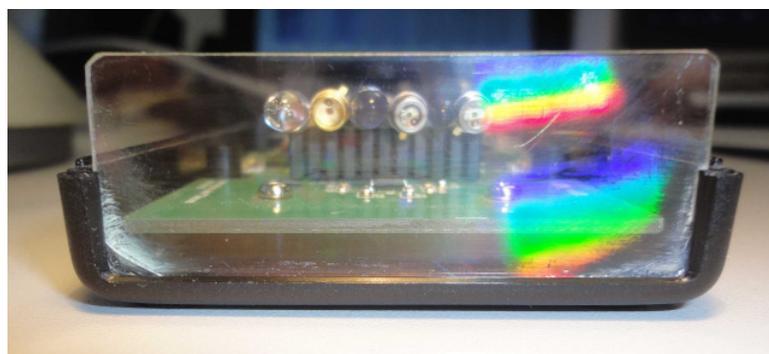


Abb. 5: Ion: Blick auf die sechs Photodioden des Spektralreglers

2. Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse

Entwicklungen im Überblick

Im Projekt wurde eine industrietaugliche Systemumgebung für spektralselektive Sensorik, bestehend aus verschiedenen Komponenten von Software und Hardware entwickelt, erprobt und in Betrieb genommen. Es gelangen erste, spektralselektive Regelungen einer Schweißmaschine (Cloos Quinto 403). Zur Inbetriebnahme gehörte die Entwicklung effektiver Meß- und Prüfmittel.

Hardwareentwicklungen

- Spektralregler ION_v10 (Abb.1a) mit den Schnittstellen
 - RS485 (duplex 4 Mbit/sec) für USB und Ethernet
 - ABIC-Interface mit SSC und SCI (<115 kb/s)
 - Bypass (schnelle Optokoppler-Schnittstelle) für Steuerung der Stromquelle
- RS485-USB-Interface USBDUXv2 mit 4Mb/s
- RS485-Ethernet-Adapter ETH2UART mit 900 kb/s
- ABIC-Busadapter_v10 SSC/SCI/MIF (mit ABIC-Modulen AB) für CAN und Profibus

Softwareentwicklungen

- Spektralregler-Betriebssystem ionOSv30
- Windows-Kommunikationsinterface LionV1 (USB)
- Prozeduren und Hilfsmittel zur Interaktion über Ethernet, CAN und Profibus

Meß- und Prüfmittel

- Zeitfunktionsgenerator DAC2X4BITv50 (simuliert 6 Photodioden)
- Vierkanal-Plasmasimulator PlasmaSim V1 auf PCB AT13 erweitert
- Scilab-Software zur Konversion von Zeitfunktionen überarbeitet
- CAN-Bus Terminaladapter/ Busmaster mit TINY-CAN1
- Profibus-DP Mastersimulator mit RS232 Adapter und PDP-SIM

Systemkonzept und Busschnittstellen

(Arbeitspakete: AP2 Entwurf einer Busschnittstelle, AP3 Schaltungsentwicklung, AP4 Design und Mechanik)

Das Starkstromkabel einer Pulsschweißmaschine zwischen Schweißmaschine und Brenner strahlt ähnlich einem Funksender ein kraftvolles, breitbandiges Störspektrum ab, dessen Schwerpunktfrequenz um 50 kHz je nach Maschine und Hersteller liegt. Da der Spektralsensor am Brenner positioniert werden muß, ist davon auszugehen, daß dessen Zuführungskabel bis zu zehn Meter zusammen mit dem Schweißkabel verlegt werden

müssen. Bei der Festlegung jeglicher elektrischer Verbindungen ist damit höchste Vorsicht angesagt. Eine einzige Erdschleife kann zu Fehlfunktionen und sogar zur Zerstörung elektronischer Bauteile führen. Alle Datenübertragungen entlang des Brennerkabels sind damit symmetrisch-differentiell und isoliert auszuführen.

Um den Spektralregler gleichzeitig als Datenrecorder für 13 Kanäle nutzen zu können, sind Datenraten mit 4 Mbit/sec erforderlich. Mit CAN oder Profibus werden diese nicht erreicht. CAN bzw. Profibus (PB) stehen nur für den Austausch von Parametern zur Verfügung. Für schnelle Datenübertragungen kommen derzeit nur Ethernet und USB in Frage.

Da Ethernet mit induktiven Übertragern isoliert wird, können nahe am Schweißkabel durch Kernsättigung oder Hysterese ebenfalls Störungen in die Übertrager eingekoppelt werden. USB ist aufgrund seines unsymmetrischen Aufbaus für stark gestörte Umgebungen eher ungeeignet.

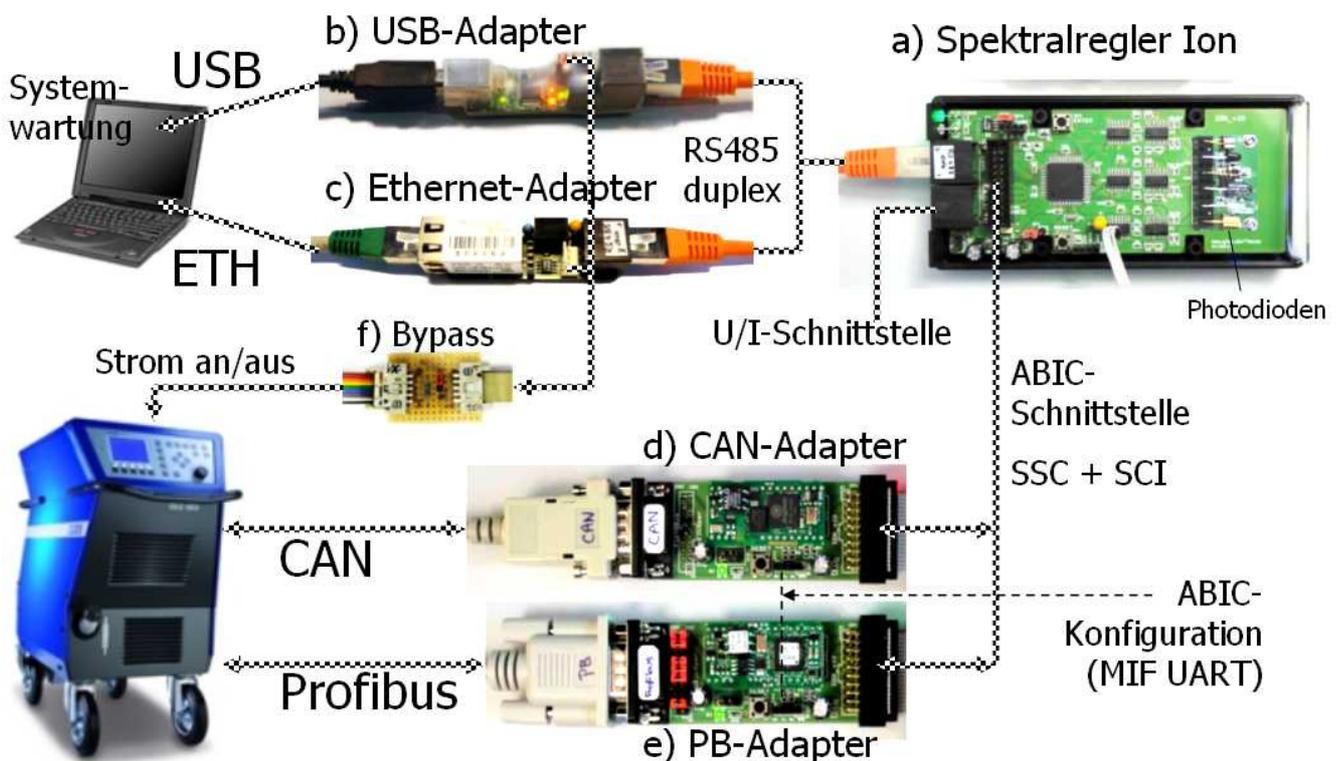


Abb. 6: Systemkonzept der Hardware für den Spektralregler: a) Spektralregler, b) USB zu RS485 Adapter, c) Ethernet zu RS485 Adapter, d) ABIC-CAN Adapter, e) ABIC-Profibus-Adapter, f) optisch isolierter Bypass zur direkten Steuerung der Schweißstromquelle (an/aus) am Terminal X15 der Quinto GLC403.

RS485-Übertragung

So entstand die Entscheidung für eine schnelle (duplex), differentielle und isolierte RS485-Anbindung für den Spektralregler. Ein RS485-Kabel liegt parallel zum Brennerkabel. Es trägt sowohl die Betriebsspannung für den Spektralregler, zwei differentielle RS485-Paare (duplex, Rx und Tx getrennt) sowie ein von einem Optokoppler kommendes Bypass-Signal zur verzögerungsfreien, direkten Ansteuerung der Stromquelle. (Im Verlauf der Software-Entwicklung zeigte sich, daß eine Simplex-Verbindung genügen würde). Die spezifisch

entwickelte RS485-Verbindung ist auch den extremen, induktiven Störungen bei Parallelführung zum Schweißkabel gewachsen.

Parallel dazu wurde zusätzlich eine universelle Busanbindung mit Anybus-IC (ABIC) geschaffen. Ein Anybus-Adapter (Abb.6 d), e)) gestattet eine variable Konfiguration für nahezu jedes Busprotokoll. Zwei Adapter (CAN und Profibus) wurden physisch aufgebaut und getestet. Zeitprobleme in der Testphase ließen allerdings den Test der ABIC-Schnittstelle unter Realbedingungen im Schweißprozeß nicht zu.

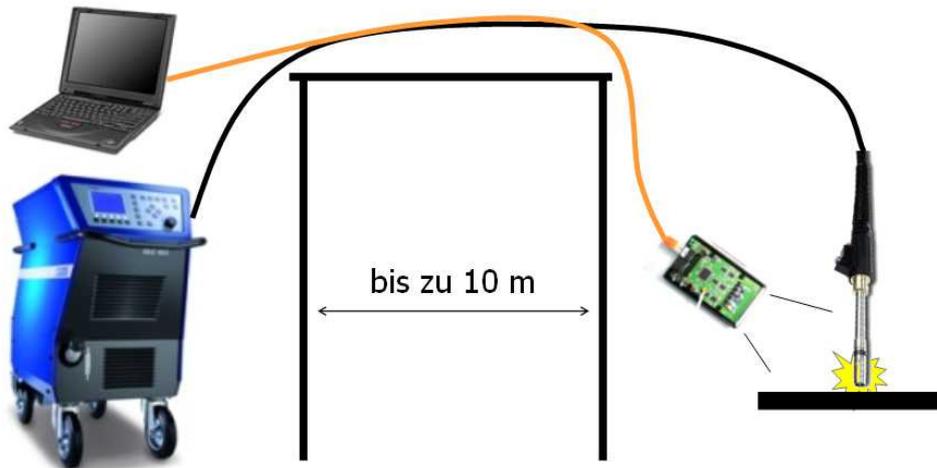


Abb. 7: Räumliche Gegebenheiten gestatten oft nur eine Verlegung der Kabel des Spektralreglers in der Nähe des Schweißstromkabels – mit Konsequenzen für EMV und Kommunikation

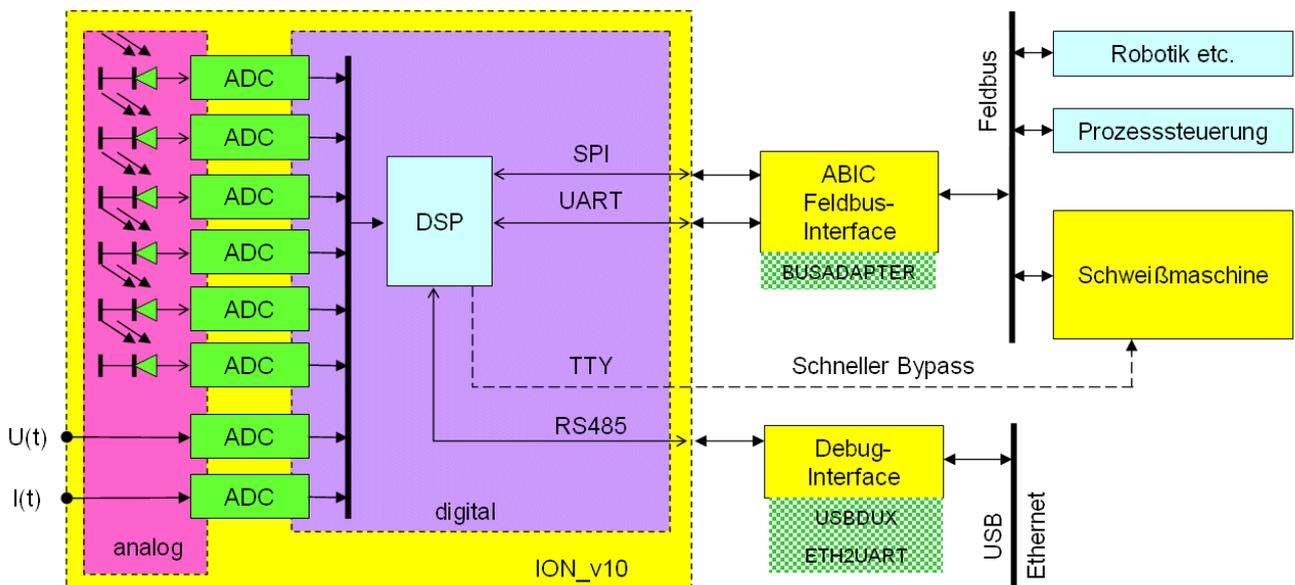


Abb. 8: Realisiertes Hardwarekonzept des Spektralreglers ION.

In der Erprobungsphase zeigte sich, daß die Recorder-Option zur Inbetriebnahme unverzichtbar ist. Diese bedingt im stark gestörten Bereich eine isolierte RS485-Übertragung und als Schnittstelle zum PC eine Adaptierung auf USB oder Ethernet. Nur ein Blick auf die gemessenen Zeitfunktionen gestattet die Korrektur von Parametern. Für die Weiterentwicklung des Systems wäre deshalb ein Verzicht auf eine direkte Feldbus-

Anbindung des Spektralreglers zu empfehlen. Eine Anbindung von CAN oder Profibus sollte erst hinter dem RS485-Adapter am Abzweig zu Ethernet oder USB auf Höhe der Schweißmaschine erfolgen.

Als Erkenntnis aus diesem Projekt ist auch mitzunehmen, daß Spektralregler über nur ein Kabel mit der Umwelt in Kontakt treten sollten, siehe Abb. 7. Dieses Kabel trägt die Spannungsversorgung, den Bypass sowie die Kommunikation (hier mit RS485).

Spektralregler Ion

Bild 8 zeigt das Hardwarekonzept des Spektralreglers. Von den Photodioden und vom Brenner $U(t)$, $I(t)$ kommende Zeitfunktionen werden verstärkt und digitalisiert. Der Prozessor (DSP) übernimmt die Aufgaben der digitalen Signalverarbeitung. Abhängig vom Schweißprogramm werden Kanäle verknüpft, und Schwellwerte geprüft. Letztlich wird die Schweißmaschine final über das START/STOP- Signal (BYPASS) gesteuert.

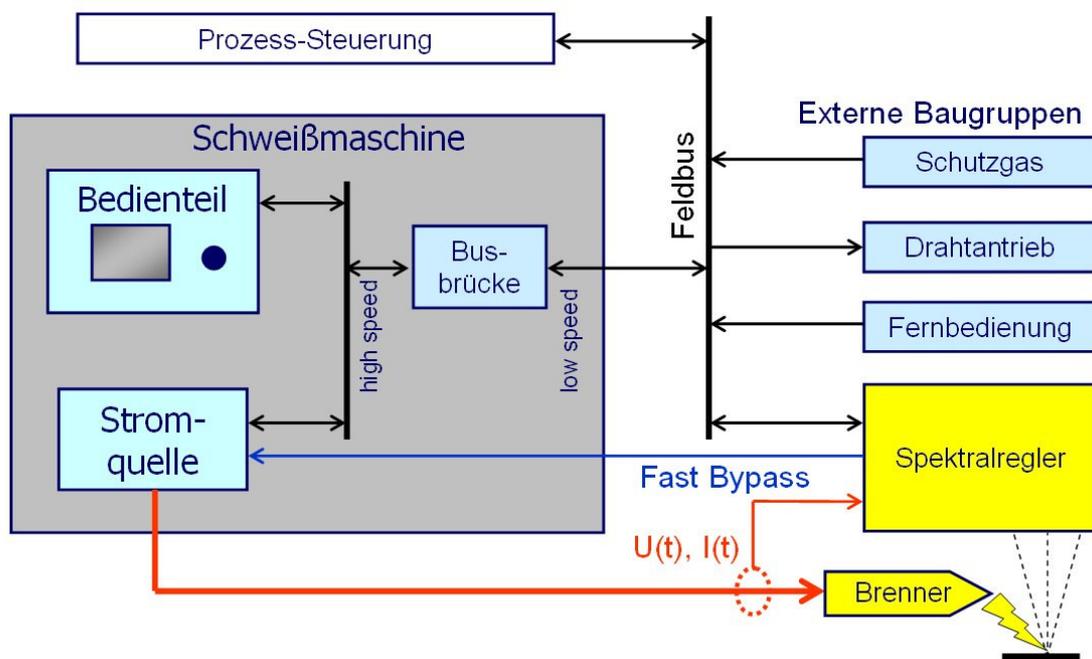


Abb. 9: Einordnung des Spektralreglers in das Konzept einer busgesteuerten Schweißmaschine. Über den Feldbus können Steuerinformationen nur im Millisekundenbereich ausgetauscht werden. Die Pulssteuerung benötigt einen schnellen Bypass, um innerhalb von $20\mu\text{s}$ reagieren zu können. Auch werden aktuelle Strom- und Spannungszeitfunktionen (U,I) benötigt.

Das Konzept des zu entwickelnden Spektralreglers geht derzeit von 8.000 Abtast- Rechen- und Bewertungszyklen („Zyklen“) pro Sekunde aus. Dazu kommen im Mode „Data-Recording“ noch die Übertragungen zur USB-Schnittstelle; zur Prozeßanalyse sollen minimal 8 Samples pro Zyklus auf einer schnellen Schnittstelle zu USB übertragen werden können. Entsprechend hoch belastet ist der gewählte 32 MHz-Prozessor vom Typ ATXmega192A3. Über einen den isolierten, schnellen duplex-RS485-Anschluß mit maximal 12Mb/s kann eine Verbindung zu USB (Datenrekorder) und Ethernet hergestellt werden.

Ein schneller Bypass ist erforderlich, da STOP- Signale zur Puls-Schweißmaschine mit einer Verzögerung unter 50 μ s vermittelt werden müssen. Dieser Anforderung ist derzeit auch der schnellste Feldbus (Industrial Ethernet, Latenz größer 1 ms) nicht gewachsen. Das Bypass-Signal ist isoliert, es wird mittels Optokoppler in Art einer TTY- Schnittstelle übertragen.

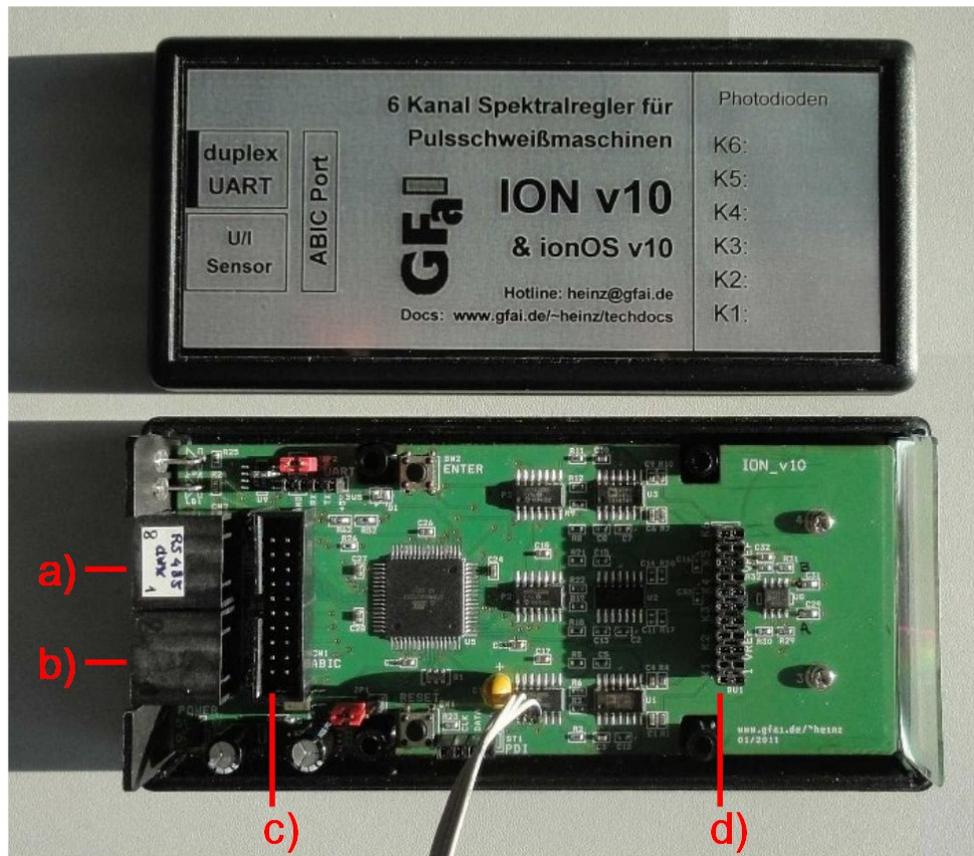


Abb. 10: Ausführung Spektralregler ION_v10: a) Schnelle, isolierte (12Mb/s) RS485-duplex Schnittstelle (UART zu USB für Data Recording und Debugging); b) Analogeingang für Schweißstrom und Schweißspannung; c) ABIC- Interface (zum Busadapter); d) Buchse für 6 Photodioden

Zur optimalen Prozeßeinstellung benötigt ein Schweißingenieur Kenntnis über alle aktuellen Zeitfunktionen. Um diese digital auf den PC zu übertragen sind zwei Wege denkbar:

- 1) Interessierende Zeitfunktionen (8...16) werden im ION zwischengespeichert, und bei Bedarf langsam übertragen.
- 2) Die 8 bis 16 Zeitfunktionswerte werden direkt, für jede Abtastung (Systick mit 48 kHz) ausgegeben.

Da favorisierte Prozessoren nur einen recht kleinen SRAM besitzen, und die Entwicklung später sehr kompakt werden soll, wurde Variante 2 gewählt. Bei einer Abtastrate von 8 kHz können final 13 Kanäle a 2 Byte bei 4 MHz übertragen werden (im Paket zu 32 Byte).

USB-Adapter

Ein schnelles, isoliertes USB-Interface (USBDEX) konvertiert die Daten der RS485 zum PC. Auf dem USB-Adapter befindet sich ein DC/DC-Wandler, der aus der USB- Versorgung eine isolierte Betriebsspannung für den Spektralregler bereitstellt. Über einen Jumper ist die Versorgung von der Schweißmaschine einstellbar.

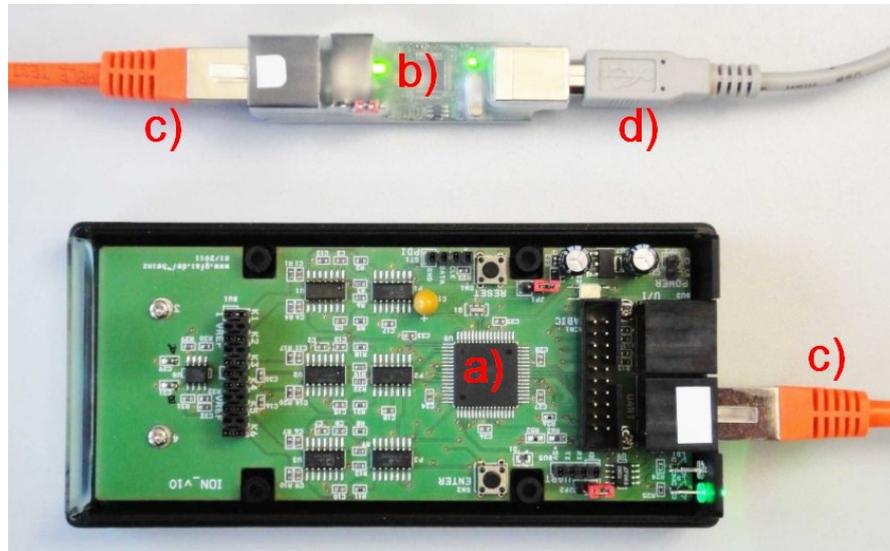


Abb. 11: Datenrecorder und Debug-Anschluß über eine schnelle, isolierte USB-Verbindung: a) Spektralregler, b) USB-Adapter USB2UARTv10, c) duplex-RS485 Schnittstelle, d) USB-Anschluß zum PC.

Da der USB- Bus nicht hinreichend störfest ist, werden Daten für die PC-Kommunikation erst unmittelbar am PC auf ein störsicheres, isoliertes RS485-Format gewandelt. Der schnelle Bypass entspringt im USB-Adapter und kann dort für Testzwecke zweipolig an einer internen Buchse abgegriffen werden. Im Arbeitseinsatz der Schweißmaschine ist über USB die Konfiguration der Parameter des Spektralregler einstellbar (siehe Softwarekomplex Lion).

Ursprünglich wurde der Ansatz verfolgt, aus Kompatibilitätsgründen zu den Feldbussen mit ASCII (ohne Paketbindung) zu arbeiten. Leider aber erwiesen sich VCP- Treiber des verwendeten USB- Konverters (FTDI FT232H) für Übertragungsraten größer 900kHz als ungeeignet. Erst ein Umrüstung der Software auf D2XX-Treiber gestattete den Übergang zu 4 MHz in einem noch zu besprechenden spezifisch synchronen Arbeitsregime.

Ethernet-Adapter

Um Fernwartung (Remote-Control) zu ermöglichen, kann anstelle des USB- Adapters auch ein Ethernet-Adapter (ETH2UART) an die RS485 angesteckt werden. Er gestattet die Einspeisung der Versorgungsspannung für den Ion, wie auch die Entnahme des Bypass-Signals. Die Isolation übernimmt hier der Ethernet- Übertrager selbst. Nur die speisende Betriebsspannung (5V, 100mA) muß erdfrei sein. Beim Übergang auf Ethernet kann am Adapter ETH2UART ebenfalls das Bypass- Signal abgegriffen werden. Auch ist hier die Betriebsspannung des Spektralreglers samt Komponenten anzulegen. Prinzipiell ist es mit diesem Modul möglich, den Spektralregler über Ethernet fernzusteuern. Leider werden mit dem verfügbaren Adapter derzeit nur 900 kb/s erreicht, damit ist die online- Datenrecorder-Funktion über Ethernet im Moment noch nicht sinnvoll.

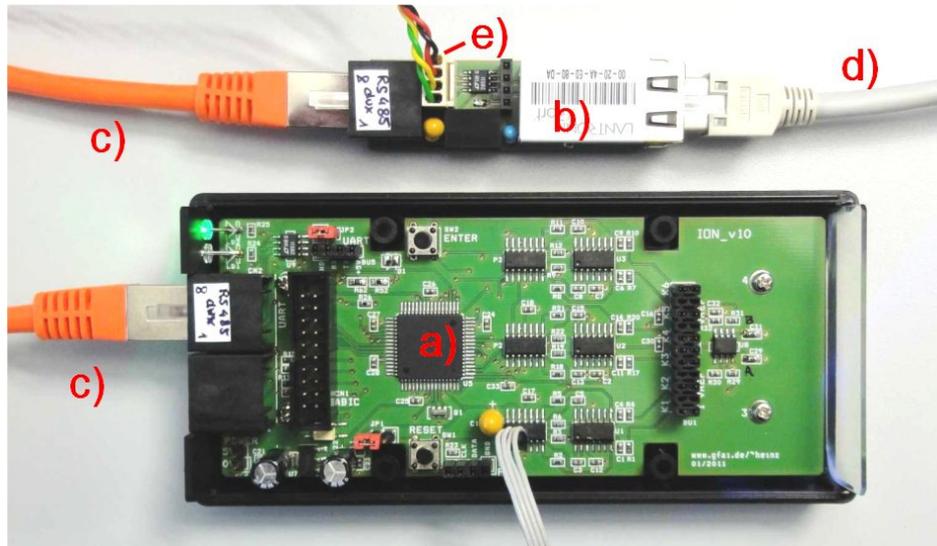


Abb. 12: Remote-Control über Ethernet: a) Spektralregler, b) Ethernet-Adapter ETH2UARTv10, c) duplex-RS485 Schnittstelle, d) Ethernet-Kabel, e) Stromeinspeisung und Bypass-Ausgang für Puls-Stop-Signal.

ABIC-Interface (CAN, Profibus)

Bei der Gestaltung des Busadapters wurde Wert auf hohe Flexibilität bei der Wahl des Bustyps gelegt. Dabei ist sowohl die Hardware- Schnittstelle, als auch der konkrete Stecker, als auch das Softwareprotokoll zu beachten. Die Wahl viel auf das modulare Anybus-Konzept, „Anybus-IC“ = ABIC der Firma HMS¹.

Damit ist ein relativ schneller und einfacher (u.U. nicht preiswerter) Zugang zu verschiedenen Bussystemen gegeben. Es stehen Module zum Anschluß an Profibus, CANopen, DeviceNet, Ethernet/IP, Modbus-TCP und Profinet zur Verfügung. Die Module besitzen am Slave-Ausgang jeweils eine SPI („SSC“) und eine UART-Schnittstelle („SCI“). Sie sind über eine weitere UART-Schnittstelle („MIF“) konfigurierbar.

Käme für den Prozessor des Spektralreglers die Aufgabe einer Feldbus-Bearbeitung hinzu, hätte man unkalkulierbare Unterbrechungszeiten (Interrupts) bei jeder nicht für den Spektralregler bestimmten Buskommunikation zu erwarten. Entsprechend wurde ein zweiteiliges Konzept gewählt, bestehend aus dem eigentlichen Spektralregler und der (variierbaren) ABIC- Busschnittstelle.

Um höchstmögliche Flexibilität zu erlangen, wurde ein universeller Busadapter entwickelt, der über eine doppelte Schnittstelle aus SPI (als Schieberegisterkette) und UART (Tx/Rx) über einen breiten Kabelstecker angebunden ist. Damit ist sichergestellt, daß der Spektralregler nur mit der ihn betreffenden Kommunikation belastet wird. Ein alternativer Entwurf des ION mit integrierter Busschnittstelle wurde als zu unflexibel verworfen. Die permanente Buskommunikation wird nur vom Anybus-IC (ABIC- Feldbus-Interface (Busadapter) wahrgenommen.

¹ Anybus-Varianten siehe <http://www.hms.se>

Da vereinbar ist, daß Einstellungen (Parameteränderungen) nur bei Unterbrechung des aktiven Schweißbetriebs erfolgen, kann sich der Prozessor somit entweder der Kommunikation oder dem Schweißen widmen.

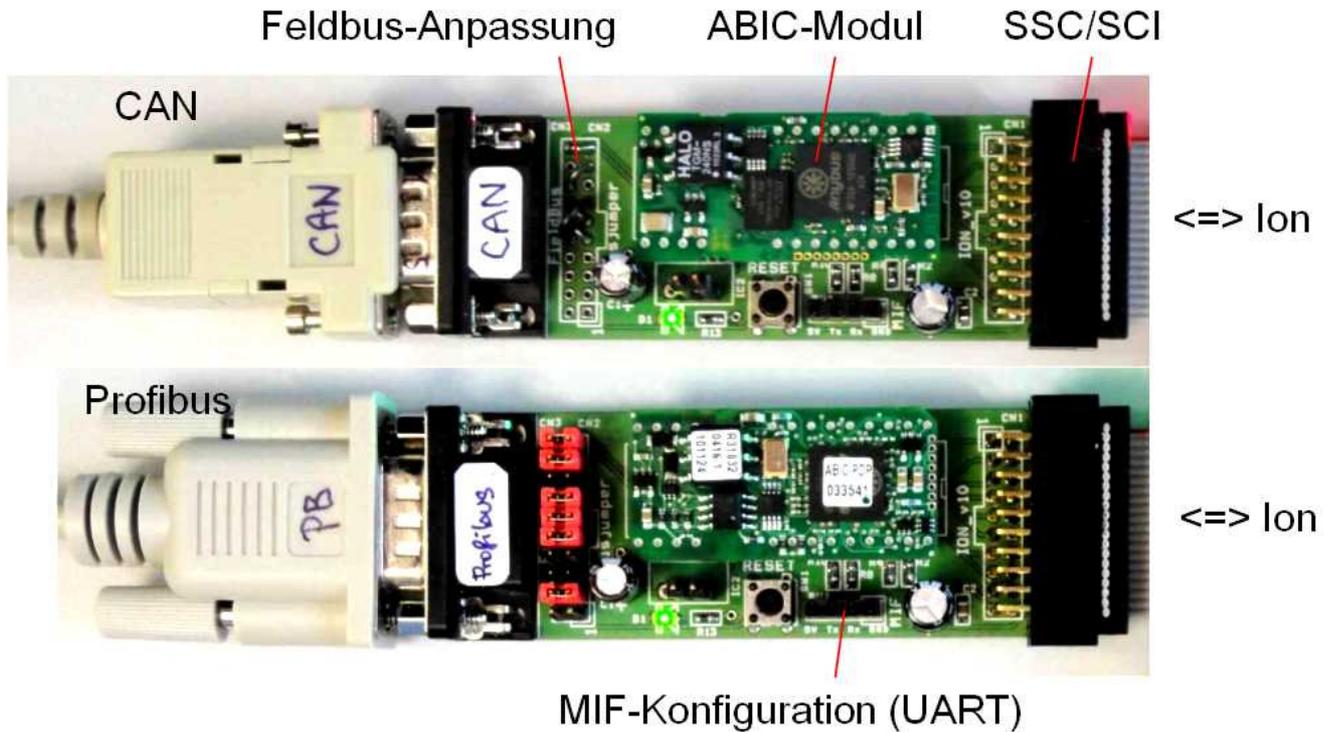


Abb. 13: Versuchsaufbauten zu CAN- und Profibus:
 a) Spektralregler ION, b) Busadapter mit jeweiligem Anybus-IC (ABIC),
 c) CAN-Busverbindung, d) Profibus-Verbindung, e) Profibus-Busmaster, f) CAN-Busmaster, g) USB-Anschluß des Busmasters

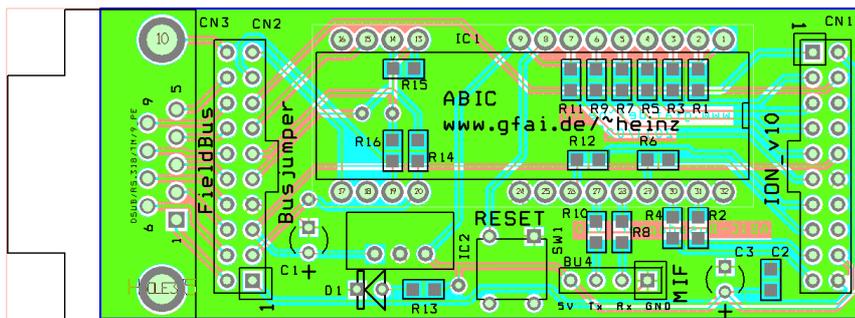


Abb. 14: Leiterkarte des Busadapter für Anybus-IC (ABIC).

Der ABIC- Busadapter wurde so gestaltet, daß verschiedene Anybus-IC konfiguriert werden können. Zwischen Feldbus- Footprint und Anybus-IC ist dazu ein Busjumper eingefügt, über den eine Zuordnung zwischen Anybus-IC Signalen FB1 bis FB6 und Stecker/Buchsen-Pins vorgenommen werden kann, siehe Abb.14.

CAN und PB unterschieden sich nicht nur im Protokoll, sondern auch hier gravierend. Während Geräte beim CAN-Bus DSUB-9 „male“ sind, sind sie beim Profibus „female“.

Entsprechend vertauscht ist die Pin-Reihfolge beim Footprint. Zum Trost liegen aber auch die Signale (beide Busse verwenden RS485 als elektrische Basis) auf jeweils anderen Pins. Auf der rechten Seite von Abb.14 erkennen wir den 20-poligen Anschluß zum ION, auf der linken Seite ist der Footprint für den Feldbus zu erkennen (DSUB-9 Stecker oder Buchse). Die serielle Debug-Schnittstelle „MIF“ des ABIC ist unten rechts als UART Rx/Tx zu erkennen. Bus-Terminierung kann optional mit R14/R15/R16 unter dem ABIC erfolgen, es ist nur statische Terminierung vorgesehen.

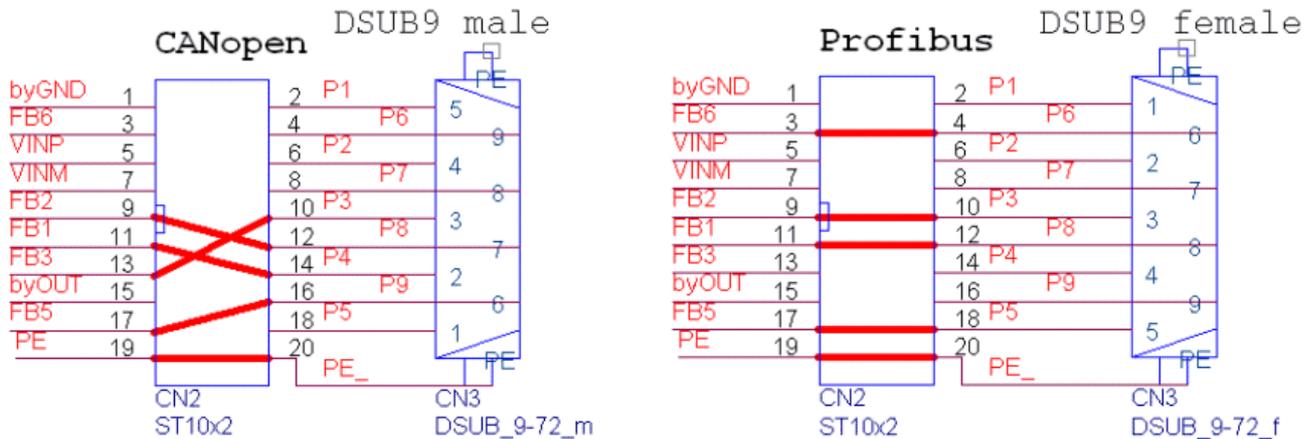


Abb. 15: Rangierung des Busjumpers für CANopen und Profibus-DP am ABIC-Busadapter. CAN und PB verwenden RS485 als elektrische Schnittstelle. Signale FBx kommen vom ABIC.

Zusammenfassung

Im Projekt wurde eine modulare Hardware-Basis als Entwicklungssystem geschaffen, welche die unterschiedlichen Bussysteme verschiedener Schweißgerätehersteller unterstützt.

Mit der Aufteilung der Kommunikationsaufgaben auf verschiedene Module steht der Weg offen, jedes dieser Module getrennt zu optimieren und weiterzuentwickeln. Der Ansatz erscheint damit optimal für einen zügigen Arbeitsfortschritt bei den verschiedenen Schweißgeräteherstellern geeignet.

Bislang wurden folgende Module und Leiterkarten entwickelt:

- Spektralregler (ION_v10),
- ABIC- Businterface (BUSADAPTERv1) für CAN-Bus/Profibus u.a. Anybus-IC (ABIC-) tauglichen Busse,
- schnelles USB- Interface USB2UARTv10 (12 Mb/s),
- Ethernet-Schnittstelle ETH2UARTv10 900kb/s), siehe Schaltpläne in der Anlage.

Mit dem Feldbus- Adapter ist eine langsame, parametrische Steuerung des Schweißreglers möglich entsprechend der Transferrate des jeweiligen Bussystems.

Eine schnelle duplex- RS485 Schnittstelle dient zusammen mit dem USB- Adapter USB2UART als Datenrekorder (4 Mb/s), um dem Einschweißingenieur eine Beurteilung der gemessenen Zeitfunktionen zu gestatten.

Dieselbe duplex- RS485 Schnittstelle kann in Verbindung mit einem Ethernet- Adapter ETH2UART (900 kb/s) der Fernwartung des Gerätes oder der Bedienung über ein Ethernet-typisches Protokoll dienen.

Eine Erkenntnis aus bisherigen Untersuchungen im Projektverlauf ist die, daß die Funktion des Ion als Datenrecorder nicht nur über die schnelle USB-Schnittstelle (im Streaming-Mode) unterstützt werden sollte. Gespräche mit Industriepartnern zeigen, daß man sich perspektivisch vorstellen kann, Data Recording verstärkt auch über den Feldbus zu nutzen. Da zu unterstützende Feldbusse aus Geschwindigkeitsgründen ein Streaming nicht gestatten, wäre hier eine Lösung mit einem größeren Zwischenspeicher gefragt.

Entsprechend könnte bei einer Weiterentwicklung des Spektralreglers eine Erweiterung um einen schnellen, seriellen Speicher erfolgen. Versuchsweise wurde dazu ein MRAM MR25H40 der Firma Everspin mit 4Mbit (512kB), 3.3V, 40MHz und 8-Pin SOIC-Package implementiert. Der derzeit real nutzbare RAM-Bereich im Prozessor beträgt 8 kByte, dieser ist mit einem MRAM effektiv zu vervielfachen.

Bei einer Zwischenspeicherung von 16 Abtastwerten a 2 Byte pro Systick (8 kHz) entstehen 32 Byte pro Systick, entsprechend sind $4\text{Mb} / (32 \cdot 8) = 16384$ Systicks zwischenspeicherbar, dies gestattet eine Aufzeichnungszeit von $8000 \text{ Hz} / 8192 \sim 2$ Sekunden. In dieser Zeit werden typisch etwa 60 Schweißimpulse gezündet. Damit stünde mit diesen neuartigen MRAMs eine Minimalvariante für ein speicherndes Debug- System zur Verfügung, welches unabhängig von der Übertragungsgeschwindigkeit der Schnittstellen universelle Bedeutung für die Prozeßanalyse einer Pulsschweißmaschine bekommen könnte.

Letztlich wurde dieses Konzept nicht weitergeführt, da eine Übertragung großer Datenmengen den Schweißregler behindert. Statt dessen wurde ein synchrones Konzept priorisiert, bei dem der Schweißregler permanent arbeiten kann. 13 Zeitfunktionen werden permanent in der Pause zwischen den Systicks übertragen.

Softwareentwicklungen

(AP5 Simulations- und Testumgebung, AP6 Implementierung von Kalibrierfunktionen, AP7 Entwurf Betriebssystem, AP8 Datenaustausch mit der Schweißmaschine, AP9 Softwareentwicklung).

Im Rahmen dieser Arbeitspakete wurde eine komplexe Software- Umgebung für Spektralregler entwickelt.

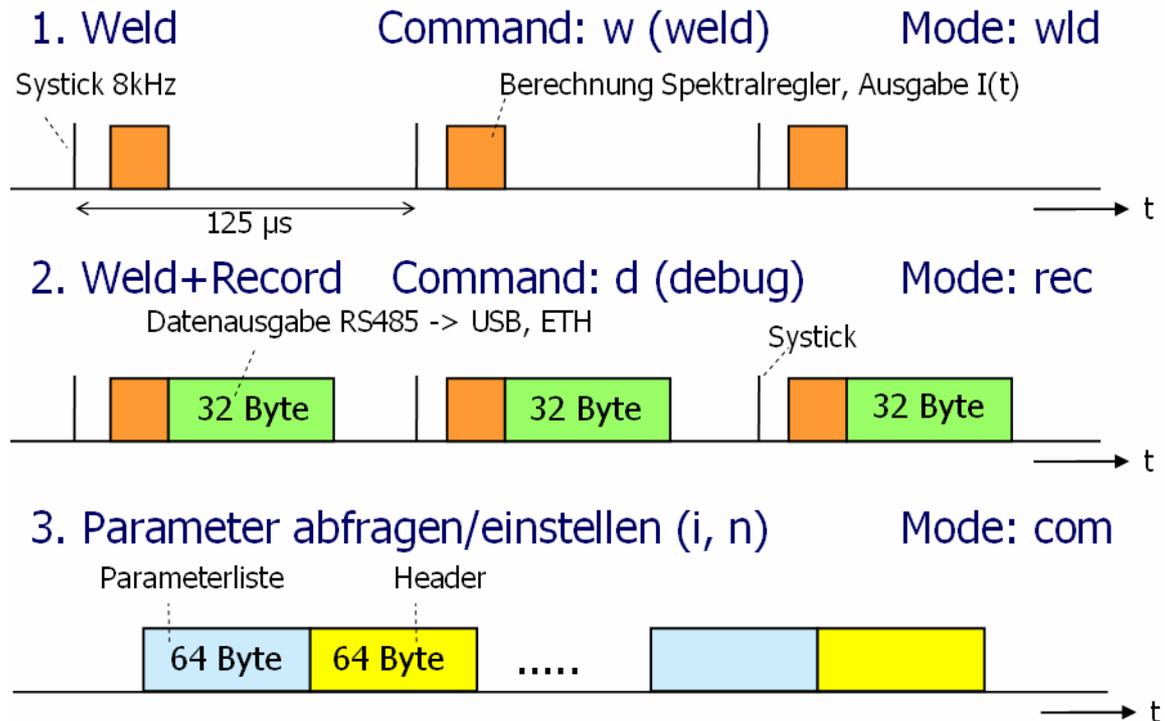


Abb. 16: Konzept des Betriebssystems ionOS des Spektralreglers.

Systemkonzept

Das Betriebssystem unterscheidet drei Arbeitsmoden. In den Moden WLD (1) und REC (2) (siehe Abb.) schweiß der Regler durchgehend (orange) und synchron zum „Systick“ (8 kHz). Der dritte Mode COM (3) dient der Kommunikation zum Austausch von Parametern. Da Empfangs-Unterbrechungen jederzeit auftreten können, wird der Schweißregler im COM-Mode durch Abschaltung des Systick gestoppt, der Schweißstrom wird abgeschaltet. In den Moden WLD und REC fragt der Spektralregler kontinuierlich die Analog-Digitalwandler (ADC) ab, berechnet die Reglerfunktion und gibt ein START/STOP- Signal über die Bypass-Schnittstelle direkt an die Schweißstromquelle. Im Mode REC (2) wird zusätzlich ein Datenpaket (grün) auf der schnellen RS485- Schnittstelle gesendet, welches die Abtastwerte von 13 Zeitfunktionen enthält. Damit wird es der Lion- Software auf dem PC möglich, daraus eine oszillographische Darstellung zu erzeugen, die dem Hersteller eine schnelle Einrichtung der Maschine ermöglicht. Abgesehen vom Kommunikationsmode COM arbeitet der Spektralregler folglich ähnlich einer Videokamera als Zustandsmaschine.

Eine der Vorgaben für Markterfolg ist Kompaktheit und moderater Fertigungs- und Kostenaufwand. Die Wahl fiel auf einen übersichtlichen, kompakten Prozessor mit 32 MHz Taktrate (ATXmega192A3). Mit diesem Prozessor bewegen wir uns aber im Live- Streaming

Mode von 8.000 Samples per Second auf 13 Kanälen. Damit muß ein Betriebssystem streng deterministisch aufgebaut werden, WindowsCE-, Linux- Derivate oder Real- Time Operating Systeme (RTOS) haben hier nichts verloren, sie würden den Prozessor quasi stilllegen. Für den Spektralregler war deshalb ein streng deterministisches, eigenes Betriebssystem zu entwickeln.

Die Software besteht aus zwei sich ergänzenden Teilen. Auf dem Spektralregler läuft ionOS, während auf dem kommunizierenden PC eine Windows-Software Lion arbeitet.

Kommunikationsstrukturen zwischen ionOS und Lion

Ion kommuniziert beim Austausch der Schweißparameter sowie beim Austausch der Zeitfunktionen mit Windows. Entsprechend bedienen Kommunikationen identische Formate, die sowohl in ionOS als auch in Lion anzutreffen sind:

Arbeitsmoden sind im C-Enumerator mode_t fixiert:

```
enum mode_t    {    // Arbeitsmoden
    wld,        // weld only, systick on, no records out
    rec,        // weld + record (on fast, duplex RS485), systick on
    com         // communicate, systick off
};
```

Die Kommunikation des Ion ist auf sechs Befehle minimiert:

```
enum cmd_t {    // Befehle, codiert ist der ASCII hex-Wert:
    d = 0x64,    // debug: weld + record, Parameter: uint8_t (Sekunden)
    f = 0x66,    // factory reset, init default parlist from ion
    i = 0x69,    // install new parameter list + save in EEPROM
    l = 0x6c,    // list all current parameters
    r = 0x72,    // restart
    w = 0x77     // weld only, no recording
};
```

Der Zugriff auf die 13 Zeitfunktionen erfolgt über eine C-Struktur rec_t (32 Byte):

```
typedef struct {    // global (6 Byte + CH*2 byte hex) CH = 13: frame = 32 Byte)
    // Bitte Reihenfolge nicht verändern!
    // measured data, output on each systick
    uint8_t    FS;    // Framesync, identifier for frame synchronisation (G)
    uint8_t    ID;    // Parametersatz-Identifer (z.B. 0x48)
    uint16_t   TS;    // time stamp, sample (wird mit systick incrementiert)
    uint8_t    SEC;   // aktuelle Sekunde
    uint8_t    CH;    // Number of following chls a 16 bit, 0x0d = 13
    int16_t    K1;    // 12 bit AD-conversion (2 byte), right adjusted, little endian
    int16_t    K2;    // signed Wertebereich 0xf800 = -2048 bis 0x07ff = 2047
    int16_t    K3;
```

```

int16_t    K4;
int16_t    K5;
int16_t    K6;
int16_t    KU;
int16_t    KI;

int16_t    RA;    // Results of calculations
int16_t    RB;
int16_t    RC;
int16_t    RD;
int16_t    RE;

} rec_t;
extern rec_t REC;    // Zugriff z.B. über REC.TS = 0x7890

```

Regler- Parameter sind ebenfalls in einer Struktur fixiert. Diese wird im EEPROM des Ion gespeichert, sodaß gewährleistet ist, daß Ion nach Reset oder Betriebsspannungsausfall stets wieder so weiterschweißt, wie vorher.

```

typedef struct {    // hex-Parameter im EEPROM 64 Byte
    // diese wird nach Reset ins RAM geladen und bei Burn ins EEPROM gebrannt
    // Globale Einstellungen
    uint8_t ID;    // Ident.-Nr. dieses Parametersatzes
    uint8_t SEC;    // zu sendende Sekunden: speziell: PRL.SEC = 0: permanent
    uint8_t AO;    // Autooffset on/off [7...0]; channels [8...1]
    uint8_t NE;    // Negation bits NEG[7...0]; channels [8...1]
    uint16_t FT;    // CPU-Clocks pro Systick
    uint16_t FH;    // Systicks pro Sekunde
    uint16_t NA;    // Nummer des Weld-Algorithmus
    uint16_t NP;    // Nummer der Diodenanordnung
    // Potentiometer
    uint16_t P1;    // Gain Potentiometer Channel 1...n
    uint16_t P2;
    uint16_t P3;
    uint16_t P4;
    uint16_t P5;
    uint16_t P6;
    uint16_t PU;    // Gain U
    uint16_t PI;    // Gain I
    // ADC Offset
    int16_t O1;    // Offset channel K1
    int16_t O2;
    int16_t O3;
    int16_t O4;
    int16_t O5;
}

```

```

int16_t O6;
int16_t OU;      // Offset channel U
int16_t OI;      // Offset channel I
// DAC VREFs
int16_t VA;      // DAC-output VREF A -> ARA (right adj)
int16_t VB;      // DAC-output VREF B -> ARB (right adj)
// Reglereinstellungen
int16_t G1;      // gain1
int16_t T1;      // time1
int16_t G2;      // gain2
int16_t T2;      // time2
int16_t G3;      // gain3
int16_t T3;      // time3
int16_t TA;      // thresholdA
int16_t TE;      // thresholdB
} par_t;
extern par_t PRL;      // Zugriff z.B. mit PRL.P1

```

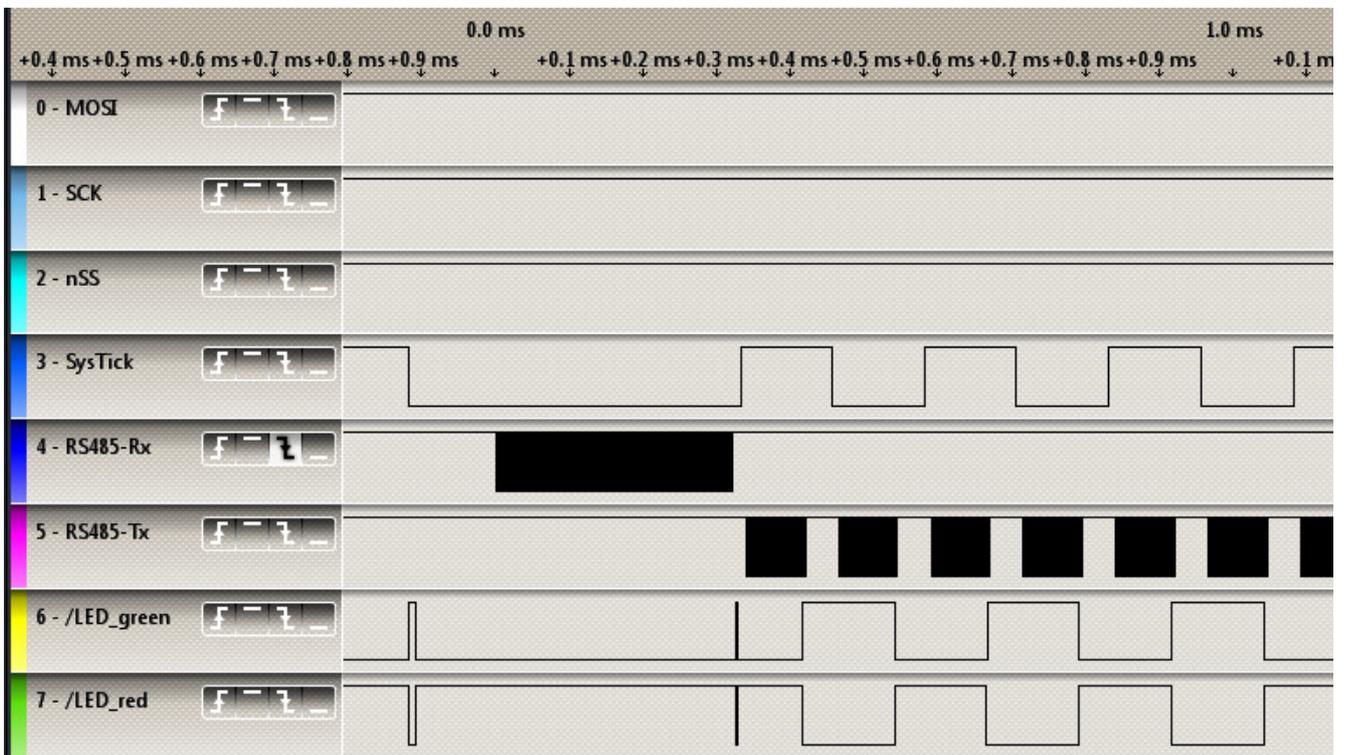


Abb. 17: Bild vom Logikanalysator: Umschaltung vom WLD- auf den REC- Mode. Nach Empfang eines Empfangspaketes (128 Byte, Struktur frame_t) werden Datenpakete (rec_t) a 32 Byte mit den Samples der 13 Zeitfunktionen ausgesandt.

Um die Kommunikation zwischen Lion und ionOS weiter zu vereinfachen, werden alle Befehle und Parameter in einem einheitlichen Datenrahmen frame_t ausgetauscht, im Bild zu erkennen als 128-Byte-Block im Signal RS485-Rx. Bei Empfang eines Frames wird der Schweißvorgang für etwa eine halbe Millisekunde unterbrochen. Das Frame- Format enthält

als Besonderheit die Parameterliste. Es wurde bewußt großzügig gestaltet, um später Erweiterungen zuzulassen. Das Feld FR.TXT wird derzeit nur zur Übertragung der Versionsinformation genutzt, die Felder FR.SRC und FR.DST sind für den Feldbuseinsatz reserviert.

```

typedef struct {
    par_t          PRL;          // Befehlsstruktur 128 Byte-Format
    uint8_t       C;           // parameter list, EEPROM-saved
    uint8_t       D;           // command: d[0xad], l, w, s[par_t]; byte[64]
    uint8_t       SRC[4];       // command data: byte[65]
    uint8_t       DST[4];       // source address
    uint8_t       TXT[54];     // destination address
    uint8_t       TXT[54];     // comment field
} frame_t;
extern frame_t FR;

```

Eine Besonderheit hat der Parameter PRL.SEC. Mit ihm werden die im REC- Mode auszugebenden Sekunden bezeichnet (0...255). Der Wert Null sorgt dafür, daß der Spektralregler ähnlich einer Videokamera permanent im REC- Mode arbeitet, er sendet auf der RS485 permanent den REC- Block (32 Byte) mit den Zeitfunktionen.

Dieselben Strukturen kommen im Lion wie im ionOS zum Einsatz.

Spektralregler-Betriebssystem ionOS

Das Betriebssystem des Ion ist unter AVR Studio4/WinAVR in C geschrieben. Es bedient die Timer zur Einstellung des Systick- Intervalls und des Herzschlages, den Digital-Analogkonverter zur Herstellung der analogen Bezugspotentiale, das EEPROM zur Abspeicherung der Parameter, die SPI- Schnittstellen für Potentiometer, ABIC-SSC sowie optional für MRAM, die UARTs für RS485 und ABIC-SCI, die LEDs, die beim Programm-Debugging eine Rolle spielen, die zwei Tasten, mit denen der Ion auf Werkseinstellung rückgesetzt werden kann, sowie die START/STOP- Funktion (Bypass) zur Schweißmaschine.

Der Spektralregler wird im WLD-Mode initialisiert, Werte aus dem EEPROM werden geladen, er schweißt also nach dem Einschalten automatisch so weiter, wie vor dem Ausschalten.

Einheitliche Zugriffsfunktionen für die verschiedenen Schnittstellen sorgen für eine uniforme Kommunikation, gleich ob die Daten von einer UART oder von einem SPI- Port kommen.

Dazu werden universelle Empfangs- und Sendeprozeduren genutzt:

```

// Receive universal
uint8_t getch(void);          // Einzelzeichen (byte)
void  getx(uint8_t *rxbuffer, uint8_t anz);  // formatiert (array)
void  getstr(uint8_t *rxbuffer, uint8_t buflen); // unformatiert (string)

// Transmit universal
void  putch(uint8_t byte);      // Zeichen (byte)
void  putx(uint8_t *array, uint16_t anz);    // formatiert (array)
void  putstr(char *string);      // unformatiert (string)

```

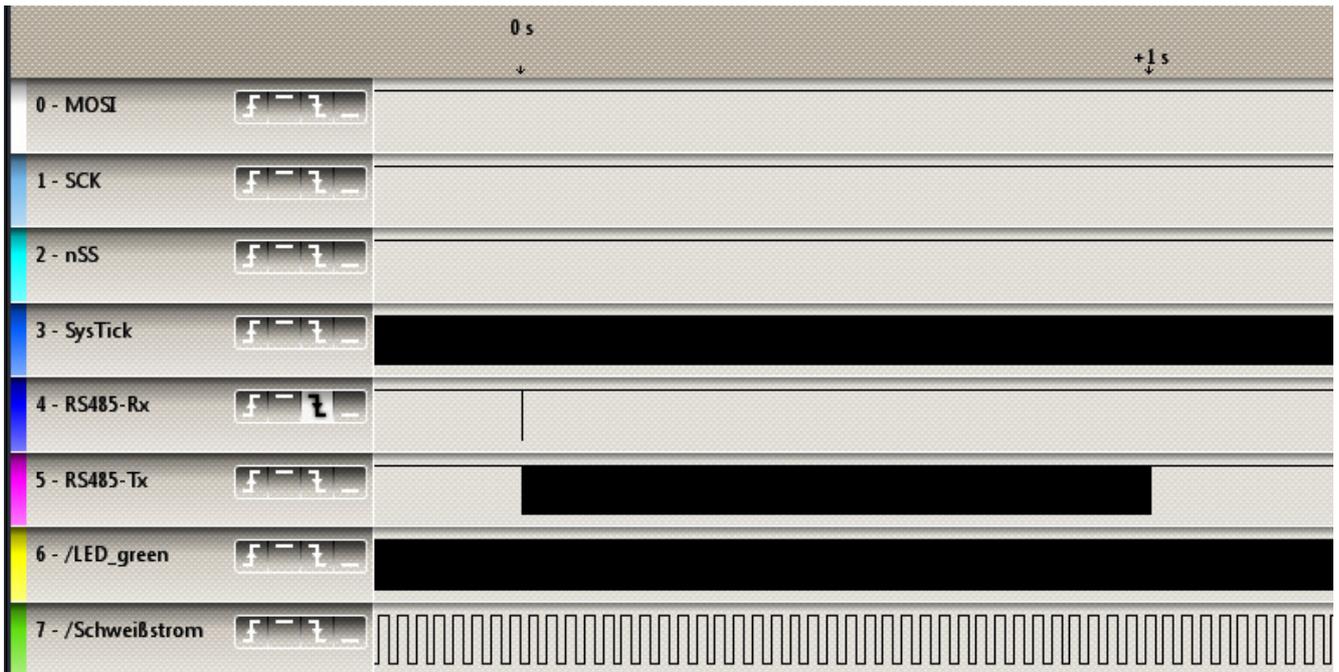


Abb. 18: Logikanalysator: Übergang vom Mode WLD zum Mode REC und zurück. Es werden eine Sekunde lang Zeitfunktionen gesendet (PRL.SEC=1). Die Regelfunktion für den Schweißstrom (7) wird nicht beeinträchtigt.

Analog zu großen Betriebssystemen werden Ports einmalig beim Hereinkommen eines Empfangs- Interrupts vereinbart.

```
typedef struct { // wechselnde Prozessorregister, gleiche Zugriffsfunktion
    register8_t *datereg; // ptr auf Datenregister (UART, SPI)
    register8_t *statusreg; // ptr auf Statusregister (UART, SPI)
    register8_t *controlreg; // ptr auf Steuerregister (/ENA MRAM-SPI)
    register8_t *portreg; // ptr auf Portregister (/CS MRAM-SPI)
    register8_t rxflag; //
    register8_t txflag; //
} reg_t;
extern reg_t REG;
```

Somit ist die Kommunikation mit beliebig anderen Feldbussen, wie CAN oder Profibus prinzipiell analog zur Kommunikation über RS485 (nur langsamer).

Eine Untersuchung der Kommunikationsschnittstellen der Feldbusse der Schweißmaschinenhersteller zeigte, daß nicht nur verschiedene Feldbusse Anwendung finden, sondern daß auch völlig unterschiedliche Sprachen, Symbolismen und Codes benutzt werden, deren Herausgabe noch dazu streng vertraulich ist. Da im Ion nur 64 Parameter zu bedienen sind, wurde auf eine Implementierung herstellerspezifischer Kommunikationsmuster verzichtet. Mit der Offenlegung der ionOS- Interfaces (Strukturen) ist eine spezifische Kopplung einer Schweißmaschine mit Ion beim Schweißmaschinenhersteller schnell geschrieben.

Einzige Beeinträchtigung des Schweißprozesses stellt der Befehl i (Install new parameter list) dar. Vom Lion werden neue Parameter übertragen, die im EEPROM des Ion zu speichern sind. Dieser Vorgang unterbricht den Schweißprozeß für etwa 23 Millisekunden, also etwa für die Dauer eines Schweißimpulses.

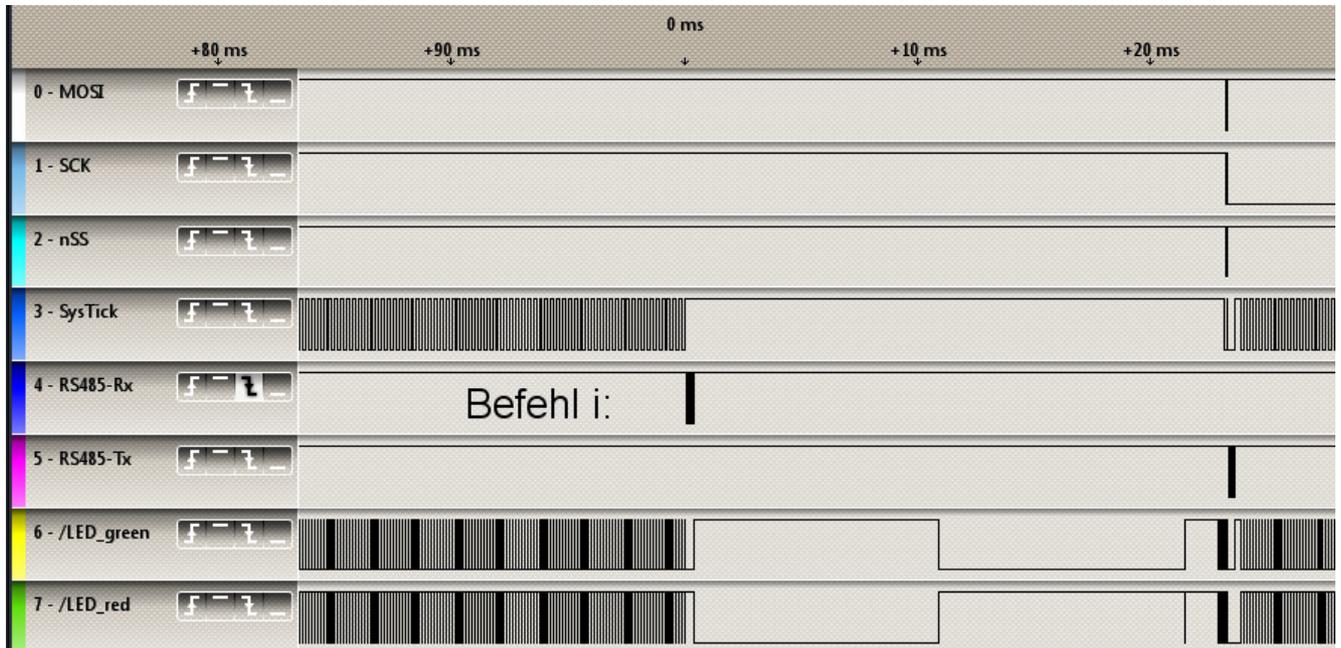


Abb. 19: Bei der Installation neuer Parameter im EEPROM mit dem Befehl „i“ wird der Schweißprozeß für 23 ms unterbrochen.

In das EEPROM werden zwei Blöcke a 32 Byte geschrieben. Danach wird das EEPROM gelesen und die Daten werden zur Verifikation zurückgesendet an Lion, zu sehen in der Zeile 5, RS485-Tx.

Windows-Kommunikation mit Lion (USB)

Wie bereits dargestellt, nutzt auch die Windows-Oberfläche die C-Strukturtypen `rec_t`, `par_t` und `frame_t` sowie die Enumeratoren `mode_t` und `cmd_t` identisch zum Ion. Damit wird Sorge getragen, daß die Kommunikation zwischen ionOS und Lion unmißverständlich funktioniert.

Lion nutzt API-Funktionen der FTD2XX Library von FTDI (USB-Interface mit FT232H). Da derzeit noch keine andere Schnittstelle für Datarecording brauchbar ist, genügt dies zur Zeit. In Zukunft wird es vorteilhaft sein, die benutzten API- Funktionen durch gleichlautende Funktionen z.B. für Ethernet oder Feldbus zu ergänzen.

Beim Start von Lion wird automatisch der Befehl „list parameters“ gesendet. Die Parameterliste wird empfangen und zugleich im Parameter- Menu eingetragen. Beim Öffnen des Parameterfelds sieht der Nutzer sofort die aktuellen Arbeitsparameter des Spektralreglers. Im Parameterfeld können Parameter mit read/write Status interaktiv verändert werden. Daneben gibt es read-only Parameter. Über deren Status entscheidet ionOS.

Mit der graphischen Darstellung der Zeitfunktionen lassen sich die Verstärkungen der Kanäle, aber auch die Reglerparameter übersichtlich einstellen.

Ergebnisse eines Records können als *.dat File abgespeichert werden. Damit kann eine Optimierung von Regler und Parametern off-line in Scilab erfolgen. Auch können die Daten zur nachträglichen Auswertung zurück gelesen werden.

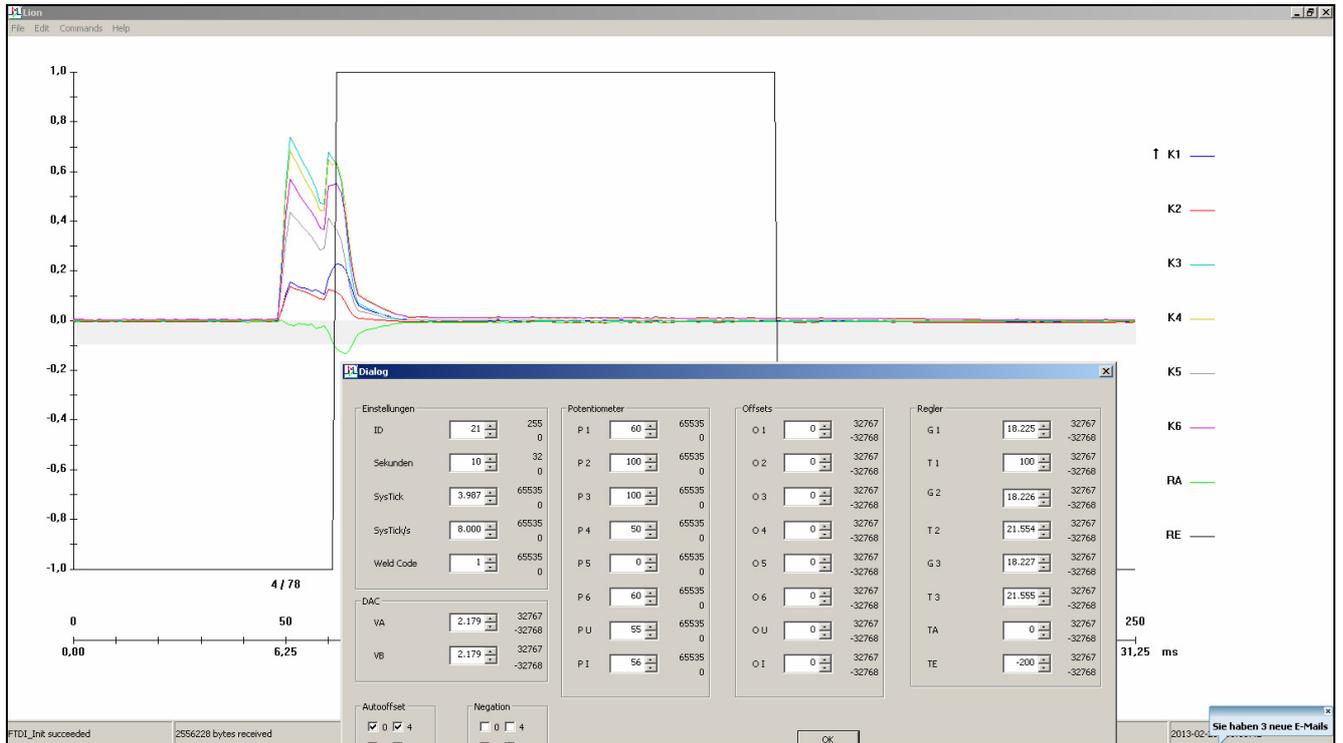


Abb. 20: Parameterliste im Lion unter Windows7. Es sind 6 Zeitfunktionen der Photodioden, eine Ergebnisfunktion (Schweißstrom an/aus) sowie die aufgeklappte Parameterliste zu erkennen

In einer Folgeversion von Lion wird noch eine kontinuierliche Darstellung (on-line) der Zeitfunktionen nachzutragen sein, die den Parameter PRL.SEC = 0 unterstützt.

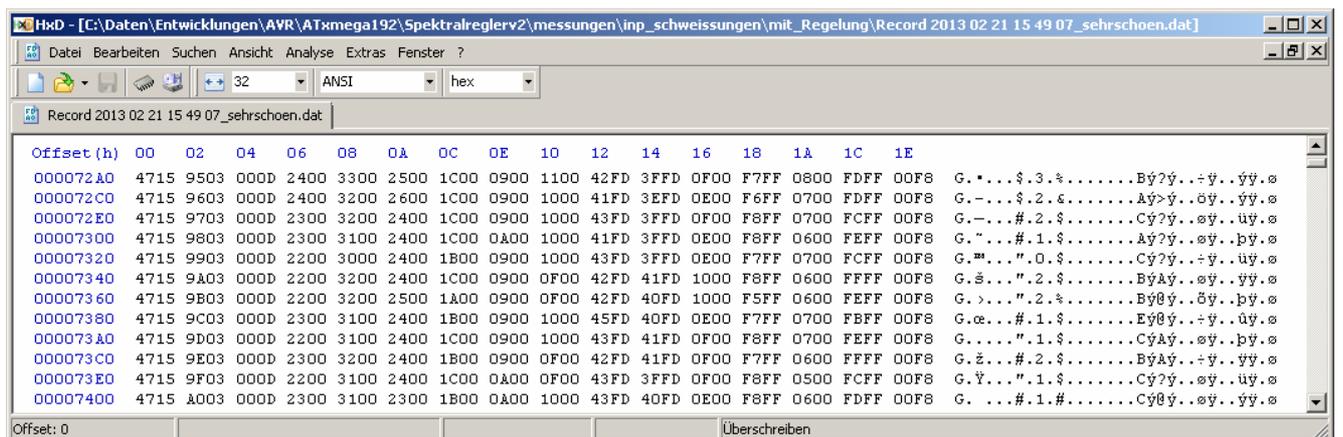


Abb. 21: REC-Format des *.dat Files mit einem Hexeditor betrachtet: Jede Zeile beginnt mit einem G, danach folgen die Parameter entsprechend der Struktur rec_t

Auch zeigt sich, daß es nützlich ist, die Parameterliste PRL im *.dat- Format abzuspeichern.

Erprobung des Verfahrens

(AP 10 Implementierung von Reglerfunktionen, AP11 Experimentierset für SM-Hersteller, AP12 Abschlußdokumentation)

Meß- und Prüfmittel

Um mit diesem Projekt einen Durchbruch zu schaffen, waren effiziente Methoden zu entwickeln, um die Meß- und Prüfbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Ein Zeitfunktionsgenerator DAC2X4BIT mit einem Prozessor ATtiny261 wurde entwickelt, dessen Stecker genau in die Buchse der 6 Photodioden paßt, und der zwei verschiedene Zeitfunktionen auf sechs Kanälen mit 8 μ A pro Kanal zur Simulation eines Photostroms bereitstellt. Dokumente sind im Internet² zu finden. Die Entwicklung wurde erforderlich, um für die Softwareentwicklung (ionOS und Lion) unkompliziert veränderte Signalformen zu erzeugen, sowie Regler zu testen.

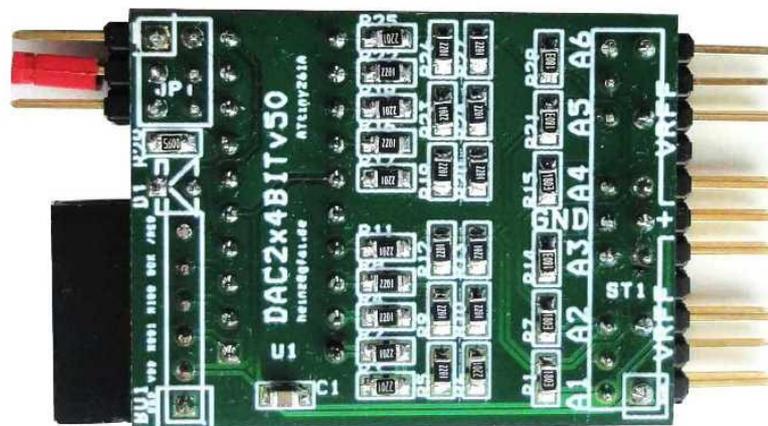


Abb. 22: Zeitfunktionsgenerator DAC2X4BIT.

Ein bereits angearbeiteter Vierkanal- Plasmasimulator „PlasmaSim“ mit einem Prozessor ATtiny13 wurde modifiziert. Dieser spielt ununterbrochen 256 Samples von vier vorher aufgenommenen Zeitfunktionen ab. Damit werden entsprechend spektral verschiedene LEDs angesteuert. Dokumente sind ebenfalls im Internet zu finden. Bestehende Scilab-Software zur Konversion von Zeitfunktionen in das PlasmaSim- Format wurde angepaßt. Prozeduren und Hilfsmittel zur Interaktion über Ethernet, CAN und Profibus waren zu schreiben. Um den CAN-Bus zu erproben, wurde ein Terminaladapter/ Busmaster mit TINY-CAN1 aufgebaut. Um Profibus-DP zu implementieren, wurde ein Mastersimulator mit RS232 Adapter und PDP-SIM genutzt.

Die Feldbus-Arbeiten wurden zurückgedrängt, als klar wurde, daß es ein echtzeitfähiges USB-Interface geben wird. Dessen Erreichbarkeit war aufgrund von Problemen mit VCP anfangs nicht klar. Auch trug zur Zurückstellung die Tatsache bei, daß nicht nur die Feldbusse, sondern auch die Philosophie zur Maschinensteuerung jedes Herstellers verschieden ist.

² www.gfai.de/~heinz/techdocs/index.htm#dac

Regler

Am patentierten Spektralregler [7, 8] war die Funktion des Spektralreglers zu erproben. Die Temperatur im Lichtbogen läßt sich schätzen, indem die Argonemission zwischen 700 und 1000 nm (K2) im Verhältnis zum Metallampf bei 440 nm (K1) bestimmt wird, Abb.23. Die Argonemission bleibt bei Erwärmung etwa konstant, jedoch entsteht mehr und mehr Metallampf. Damit steigt die Zeitfunktion K1, während K2 durch Verdunklung des Lichtbogens durch Metallampf sogar leicht fällt. Unterschreitet die Differenz RA eine Schwelle von -0,2 (graues Band) wird die Schweißstromquelle abgeschaltet, Signal RE.

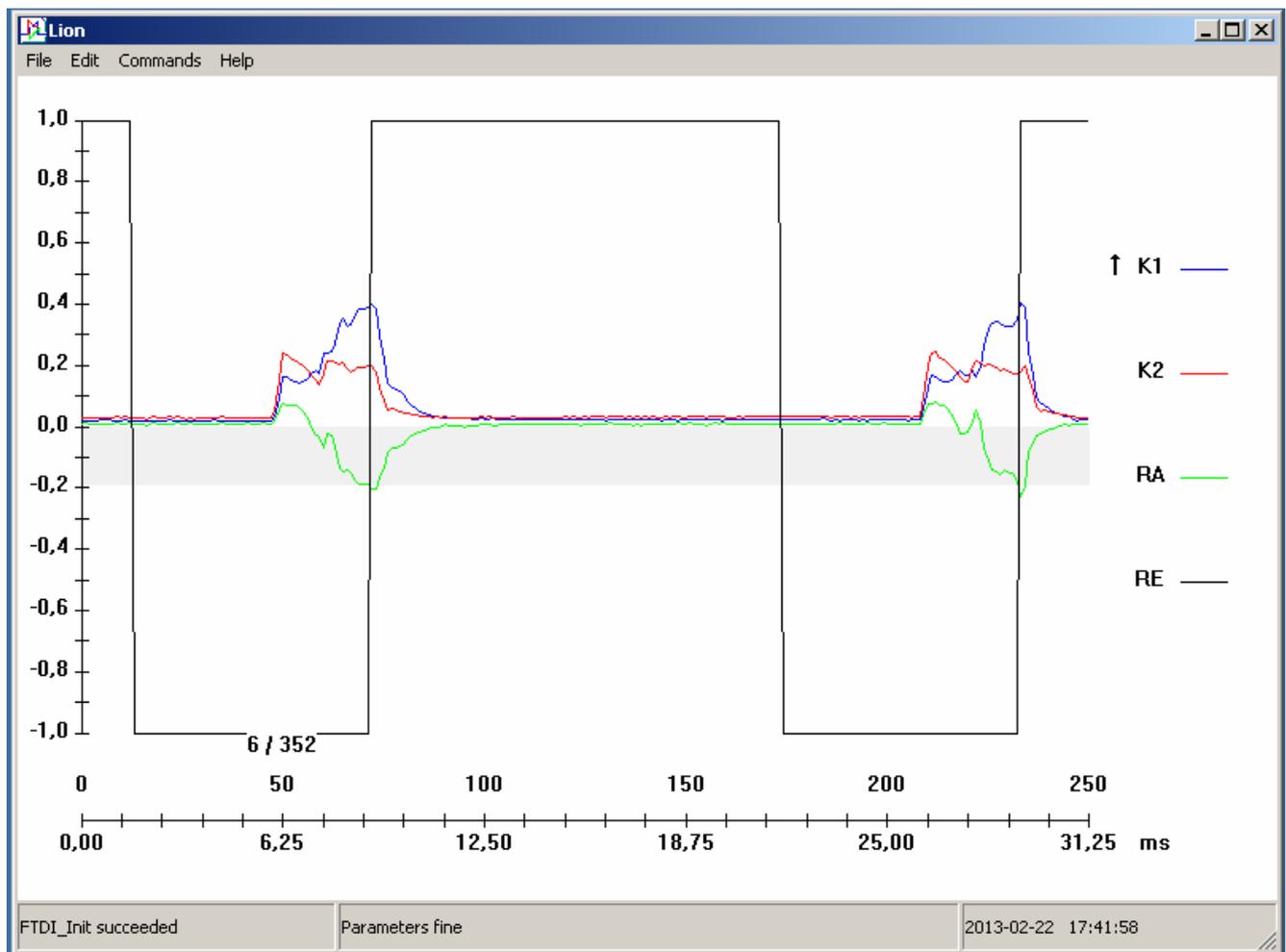


Abb. 23: Erste geführte Regelung als Differenz zwischen Metallampf- (440nm) und Argon- Emission (hier 950nm). $RA = K2 - K1$; Schweißstrom- STOP (RE), wenn RA den Schwellwert -0,2 durchläuft.

Mit dieser Art der Regelung wird insbesondere im Dünnblechbereich ein Durchbrennen verhindert.

Abb. 23 zeigt eine geführte Regelung, bei der die Schweißmaschine den Pulszyklus vorgibt. Nachdem der Regler das STOP- Signal rückgesetzt hat, vergeht einige Zeit, ehe die Schweißmaschine einen weiteren Schweißpuls startet. Diese Art der Regelung hat den Vorteil, daß die Einstellung des Pulsabstands an der Schweißmaschine auf das Ergebnis wirkt.

Im nächsten Versuch wurde eine freie Regelung probiert, bei der der Spektralregler den Pulsabstand vorgibt, Abb.24. Im Spektralregler arbeitet derselbe Algorithmus, verändert wurde nur die Einstellung der Schweißmaschine. Diese befindet sich jetzt im Slave- Mode. Der Spektralregler hat damit die vollständige Kontrolle über den Schweißprozeß übernommen. Er schaltet direkt die Stromquelle der Schweißmaschine ein und aus. Am Bedienteil der Schweißmaschine wurden nur Pulsstrom (350 A) und Grundstrom (25 A) eingestellt. In einer aufwendigen Prozedur sind vorab einige Sicherungen und Schwellwertregler der Schweißmaschine abzuschalten. Geschweißt wurde mit AlMg4,5Mn Draht 1mm auf Alu- Platte unter Schutzgas Argon.

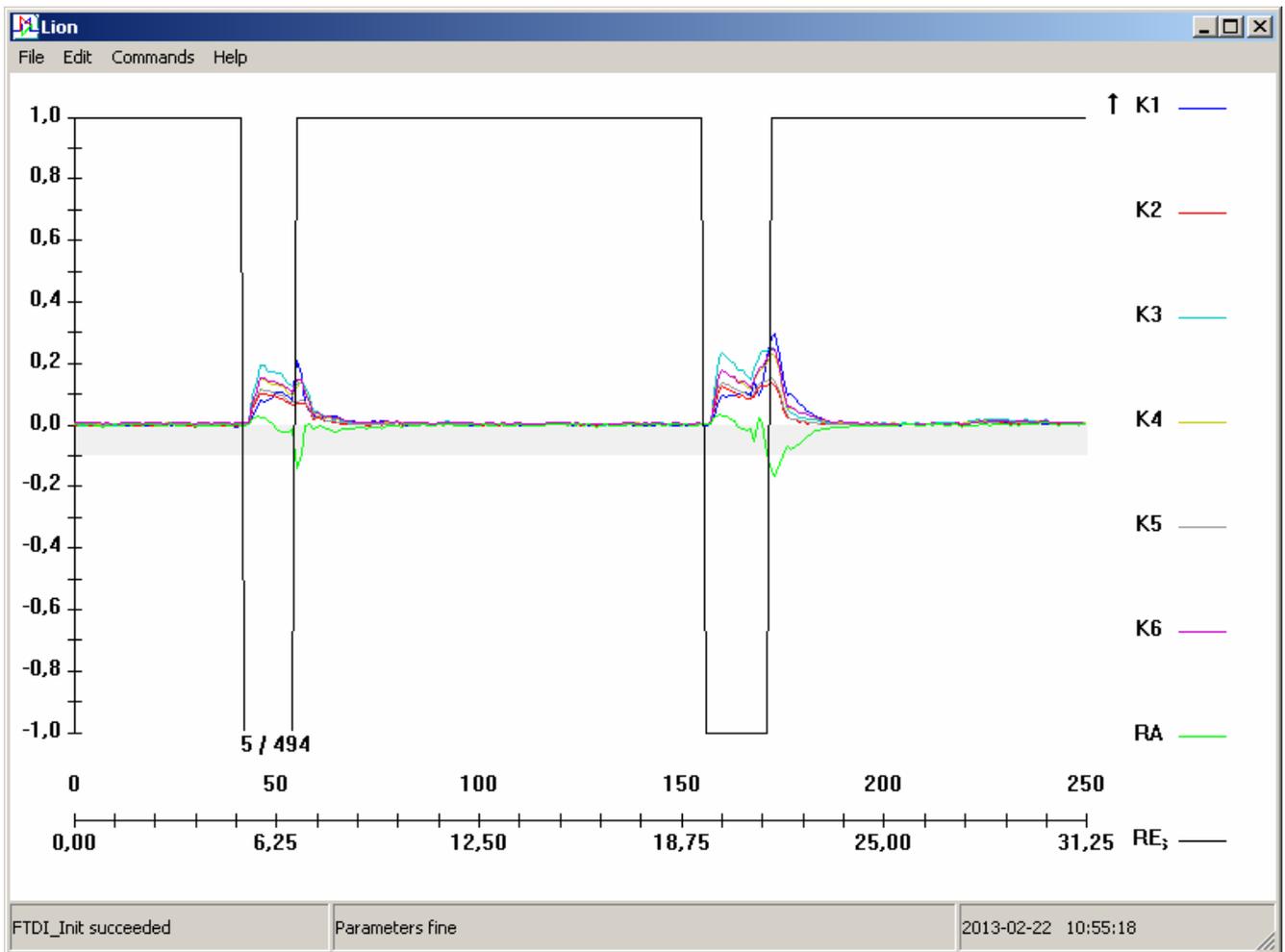


Abb. 24: Erste freie Regelung einer Pulsschweißmaschine mit digitalem Spektralregler Ion. Der Spektralregler regelt Pulsdauer und Pulspause. Verwendet werden hier nur die Kanäle K1, K2, RA, RE

Im Bild 24 sind zusätzlich die Kanäle K3 bis K6 dargestellt. Diese wurden allerdings nicht genutzt. Die Kanalzuordnung der Photodioden ist: K1 440nm, K2 950nm, K3 740nm, K4 1.5µm, K5 900nm, K6 2.3µm. Die Schweißmaschine Cloos-Quinto GLC403 wurde über den Stecker X15 Pin2 angesteuert. Das anzulegende (5Volt-) TTL Signal STOP hat positiv zu sein. Eine kleine Anpaßschaltung, der Quinto- Adapter wandelt das ankommende, erdfreie TTY-Signal vom Optokoppler des Ion in ein TTL-Signal. Es ist vorteilhaft, im Quinto-Adapter den Jumper JP2 auf 2-3 (invertiert) zu setzen, und mit dem Ion ein negiertes Signal /STOP

zu erzeugen. Grund dafür ist der Optokoppler, der die HL-Flanke zehnfach schneller durchschaltet, als die LH-Flanke.

Es wurde darauf Wert gelegt, die Struktur des Reglers einfach zu halten, sodaß später auch ein Schweißingenieur einen neuen Regleralgorithmus implementieren kann. Hier der oben verwendete Algorithmus, wie er unter IonOS im Mikrocontroller läuft.

```

void Regler(void) { // C-Algorithmus Schweißregler aus ionOS
    //wird mit jedem Systick-Interrupt ausgeführt (8 kHz)
    static uint16_t systick; // lokaler Systick für Pulsdauer
    // ADC laufen im "Freerun" mit 500 kHz,
    // alle 22 µs ist je ein neuer Wert da: 12 bit right adj.

    // ADCs lesen und Offset vorzeichenrichtig korrigieren
    REC.K1 = ADC_K1 + PRL.O1; // 440nm Metalldampf
    REC.K2 = ADC_K2 + PRL.O2; // 950nm Argon

    // Reglerwerte berechnen, Ergebnisregister RA...RE
    REC.RA = REC.K2 - REC.K1; // Differenzen
    // REC.RE // Strom an/aus -> schweisstrom ()

    // Parameterliste PRL:
    // PRL.T1: Pulsverlängerung in Systick (8 pro ms)
    // PRL.TA: Schwellwert für STOP welding
    // PRL.T1: Berechnetes STOP-Ende
    // PRL.TE: Schwellwert für Stop z.B. -200 (-2048...+2047)

    // Weld-Stop prüfen mit TE
    if (REC.RA < PRL.TE) { // TE: Schwellwert für Stop
        systick = 0; // reset, solange Stop
        schweisstrom(stop);
    };

    // Weld Restart nach Pulsverlängerung um T1
    if(systick > PRL.T1) { // Pulsverlängerung in Systicks (8 pro ms)
        schweisstrom(start); // z.B. 12 ms = 12 x 8; T1 = 96 Systicks
    }
    systick++; // Pulsverlängerung
} // Reglerende

```

Neben dieser vergleichbar einfachen UV/IR-Regelung können im Ion komplexe Regelalgorithmen angewandt werden, wie zum Beispiel eine Mehrpunktregelung. Grundidee ist die Analyse einer normierten Planckstrahlungsdichte, Abb.25.

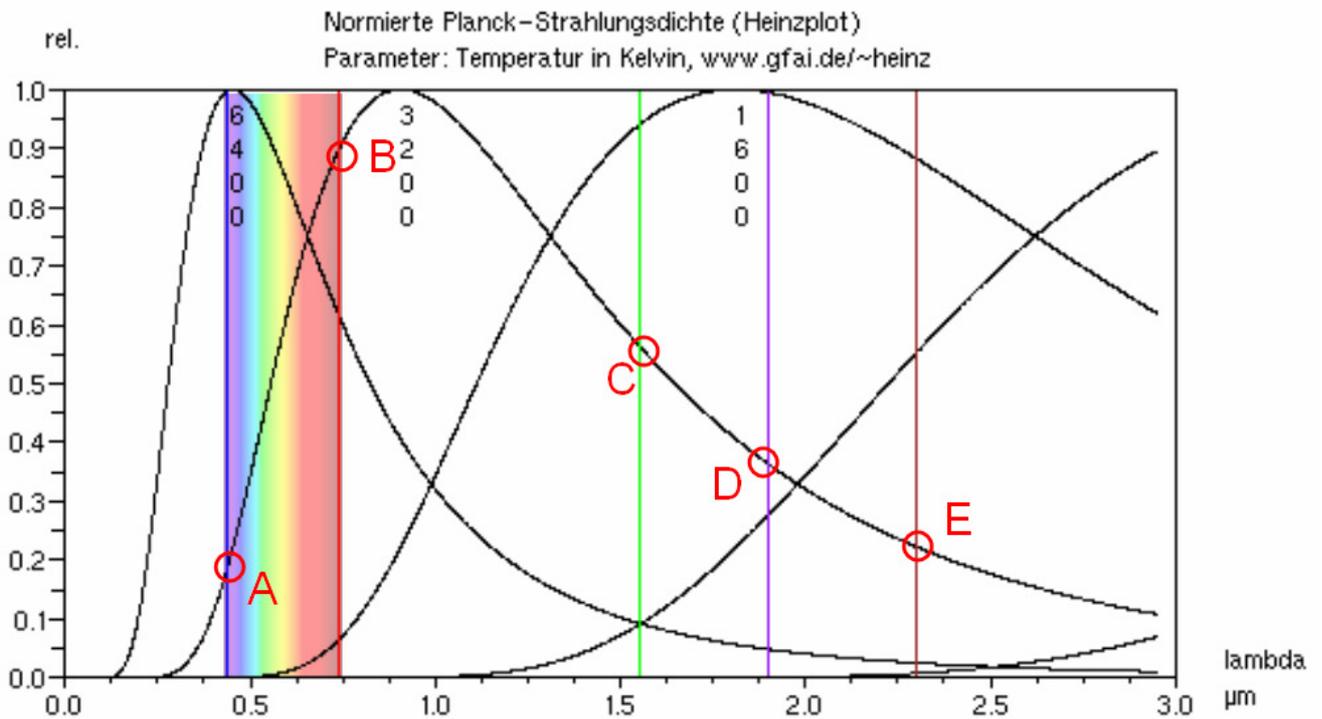


Abb. 25: Normierte Planckstrahlungsdichte mit fünf Photodioden (A bis E) für drei Temperaturen des schwarzen Strahlers: 1600, 3200, 6400 Kelvin

Die Darstellung zeigt die relativen Emissionsstärken von fünf Photodioden (A bis E) in Abhängigkeit von der Temperatur eines schwarzen Strahlers. Bei einer Temperatur von 3200 K zeigen die Dioden in Relation zueinander die mit A bis E gekennzeichneten Emissionswerte. Wird eine andere Temperatur betrachtet, so verschieben sich die Emissionen der Dioden zueinander in charakteristischer Weise. Man betrachte dazu die Schnittpunkte der Kurven für 1600 oder 6400 Kelvin mit den Wellenlängen der Dioden. Man erkennt, daß die relative Emission der Dioden zueinander die Temperatur eines schwarzen Strahlers anzeigt.

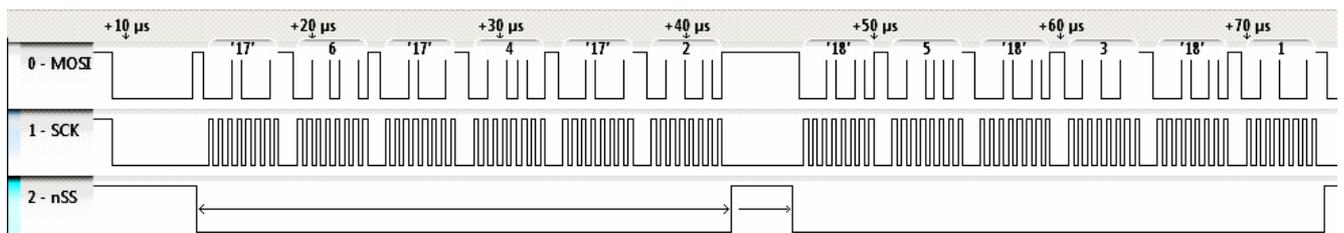


Abb. 26: Zur Einstellung von sechs Verstärkungen über SPI sind 2x6 Byte durch die Potentiometer zu schieben. Bei derzeit 2 MHz vergehen dafür ca. 70 μs, dargestellt ist die Funktion f (factory-reset) des Spektralreglers

Für die Fügetechnik ist dieses Verfahren überall dort interessant, wo Festkörperemissionen oder Plasmaemissionen zu messen sind. Eine Implementierung im Regler benötigt lediglich geschickte Normierungen. Wiederum kann an Schwellwerten entschieden werden, was zu tun ist. In der Pulsstromphase kann die Plasmaemission gemessen werden, während in der

Grundstromphase (STOP) die Schwarzkörperstrahlung der Metalloberfläche (des Bades) gemessen werden kann.

Beim Versuch einer Nutzung dieses Verfahrens zeigte sich, daß die Amplitudendynamik ein Problem darstellt, siehe Abb.26. Die Plasmaemission ist je nach Diode etwa einhundertfach höher, als die thermische Emission des Schweißbades. Es ist derzeit nicht möglich, die Potentiometer in Echtzeit zwischen beiden Emissionen umzustellen. Das SPI-Interface der Potentiometer erlaubt maximal 5 Mbit/s, eine Einstellung aller Potentiometer mit Maximalgeschwindigkeit ist in etwa 30 µs möglich – zuviel, um bei jedem Systick zu erfolgen. Auch reicht der Potentiometerbereich (linear 0...255) nicht aus. Hier sind bereits neue Ideen für Ergänzungen zum Schaltungskonzept des Spektralreglers gefragt. So könnte man sich eine schnell umschaltbare Verstärkungs- oder Dämpfungsstufe pro Kanal vorstellen.

Experimentierset ION

Um der deutschen Schweißindustrie einen Zugang zur spektralen Regelung von Pulsschweißmaschinen zu gestatten, wird ab 4/2013 eine minimale Version der Versuchsanordnung als „Experimentierset ION“ angeboten. Dazu gehören die Komponenten:

Hardware:

- Spektralregler Hardware auf PCB ION_v10
- USB-Interface USBDUXv2 (RS485 duplex)
- Bypass-Adapter (kundenspezifisch)
- Kabelmaterial

Software ionOS + Lion

- Betriebssystem ionOSv3
- Windows-Software LionV1

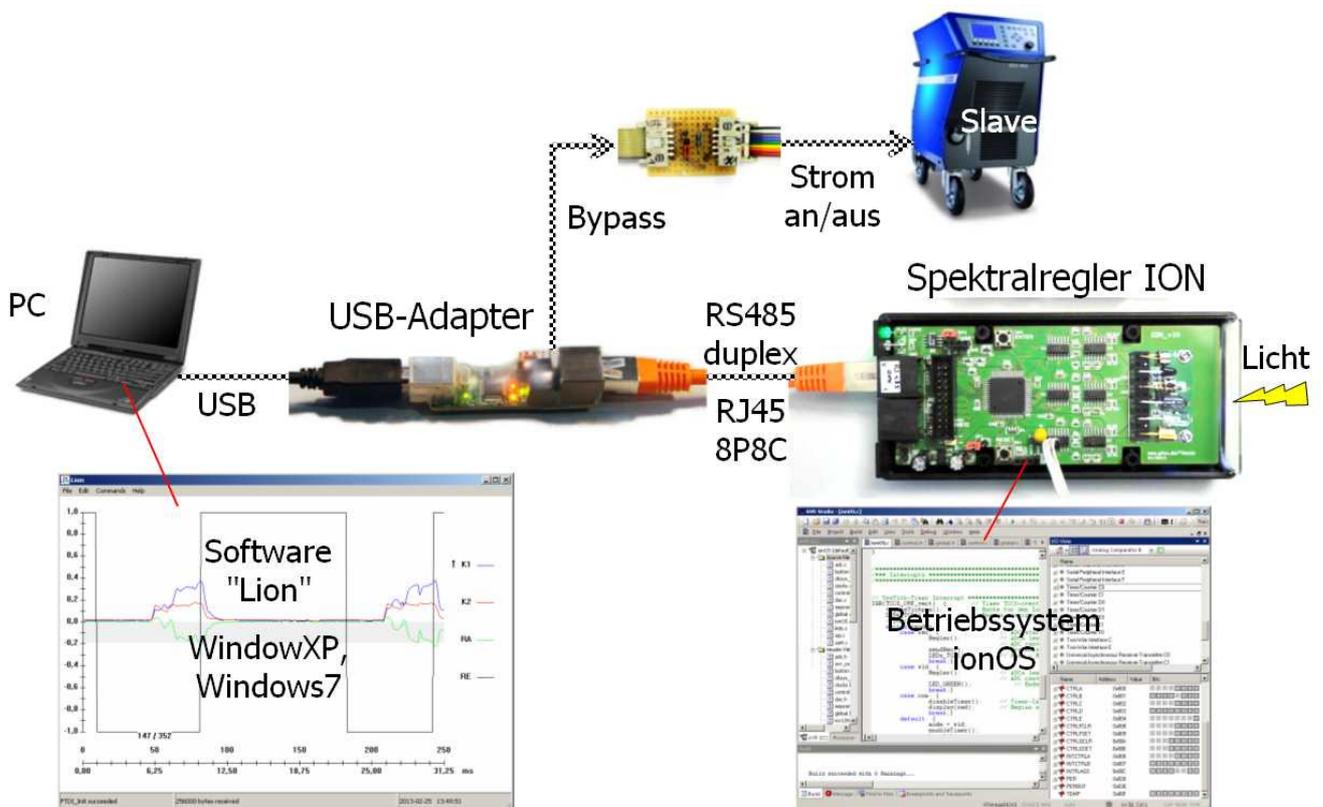


Abb. 27: Bestandteile des Experimentierset ION.

Optional wird als Zubehör angeboten:

- RS485/Ethernet-Adapter ETH2UART
- Zeitfunktionsgenerator DAC2X4BITv50
- spektral selektive Photodioden, soweit verfügbar
- ABIC-Busadapter v10 mit CAN- oder Profibus-Interface

3. Bewertung der erzielten Ergebnisse in Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen des Antrages

(Bezugnahme auf die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, Bezugnahme auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises)

Bei Erstellung des Antrages waren bei Schweißmaschinenherstellern Feldbusse in Mode gekommen. Man ging davon aus, daß neue Maschinengenerationen nur noch über einen einheitlichen Feldbus anzusprechen seien.

Inzwischen wurde nicht nur in der Schweißindustrie klar, daß Feldbusse nicht nur Probleme lösen, sondern eine Reihe zusätzlicher Probleme verursachen. Datenübertragungen werden gegenüber Punkt-zu-Punkt UART- Verbindungen mit RS422 oder RS485 gravierend langsamer, zusätzliche Busumsetzer (z.B. Anybus-Prozessoren) sind erforderlich, die Technik verteuert sich erheblich. Energie- und Platzbedarf steigen. Schwer zu bekommende Spezialisten sind gefragt. Implementierung neuer Funktionalität ist viel aufwendiger als vorab. Fehlersuche in Feldbussen wird zum Geduldspiel. Die Euphorie hat sich gedämpft.

Entsprechend sank die Kurve der Bedeutung von Feldbussen kontinuierlich im Projektzeitraum. War man zu Beginn der Entwicklung noch überzeugt, im Rahmen der Schweißindustrie einheitliche Standards etablieren zu müssen, so hat man heute eher resigniert. Man paßt die Maschinen notgedrungen an jeden Bus an, der in Form eines Robotersystems oder einer Taktstrasse zu bedienen ist. Entsprechend verringerte sich des Gewicht des Antrages in Fragen CAN oder Profibus.

Andererseits wurden Probleme sichtbar, wo keine erwartet wurden. So wurde Lion ursprünglich mit API- Funktionen von VCP (Virtual Common Port) versucht – mit erstaunlichem Ergebnis. Oberhalb von 900 kbit/sec griff VCP ab und an auf den Kernel von Windows7 durch und ließ die Fenster fliegen. Man erschrickt schon einigermaßen, wenn plötzlich das Windows-Start-Icon vorbeihuscht oder sich Explorer- Fenster im Sekundentakt öffnen und schließen. Zum Glück enden solche Versuche meist mit blauem Bildschirm und ohne Plattencrash.

Unerwartete Probleme und einen Zeitverzug von Monaten bereitete auch der neue Prozessor. In der Erprobungsphase traten immer wieder sporadisch Interrupt- Störungen auf. Alle paar Systicks fehlte plötzlich einer. Eine Sekunde Daten- Recording dauerte plötzlich 1,1 Sekunden im Ergebnis. Die Vermutung, es handele sich um überlaufende Arraypointer, bestätigte sich nicht. Wochenlang wurde Funktion für Funktion ausgetauscht – ohne Ergebnis. Mal trat der Fehler stärker, mal weniger stark auf. Zum Schluß blieb nur noch die Idee, eine Neuerung der ATXmega- Prozessoren, mit der sich noch niemand so recht auskennt, könnte die Ursache des Übels sein. Innerhalb von drei Tagen wurde das neuartige Event-System des Prozessors demontiert und gegen herkömmliche Interrupts ausgetauscht: Seither funktioniert der Spektralregler fehlerfrei.

Verschiedene Reglerfunktionen wurden implementiert und getestet. Ein hoher Zeitbedarf für Fehlerbeseitigung im Gesamtsystems (siehe oben) verhinderte indes die weite Erprobung verschiedener Regelstrategien im realen Schweißexperiment. Allerdings konnte ein bereits erprobter Zweipunktregler an der Schweißmaschine verifiziert werden, damit ist die Funktion des entwickelten Spektralreglers gegeben.

Die Frage der technologischen Prozeßeinbindung, so zeigte sich, ist erheblich umfangreicher als angenommen. Dazu wäre ein Folgeprojekt mit einem Schweißpartner anzuregen, bei dem auf Basis des nun real existenten Spektralreglers Ion in bedeutendem Umfang Schweißexperimente durchgeführt werden können. Der Rahmen dieses Projektes war dafür zu eng, hier sollte ein Durchbruch für einen digitalen Spektralregler erreicht werden, dieser wurde erreicht.

In der Erprobung zeigte sich, daß dennoch weiterer Forschungsbedarf besteht. Wie schon dargestellt, fehlt eine Live- Streaming Option in der Software Lion. Die Parameterliste muß mit in die Datenfiles (*.dat) aufgenommen werden. Eine zusätzliche Funktion zum unkomplizierten Einbinden neuer Reglerstrategien ohne Atmels Boot- Loader wäre erforderlich. Und eine schnell schaltbare Umstellung der Verstärkung fehlt noch.

Aber das sind Kleinigkeiten im Verhältnis zum Erreichten.

Das Projekt zeigte sich erheblich anspruchsvoller, als im Antrag vermutet. Wie der Darstellung der Ergebnisse zu entnehmen ist, lag eine Fülle kleiner und großer Hürden im Weg. Das entstandene, sehr einfache Systemkonzept und ein nun verfügbarer, welterster, richtig gut funktionierender, digitaler Spektralregler rechtfertigt aber den enormen Streß für alle Beteiligten. Danke an alle Mitstreiter!

Der zahlenmäßige Nachweis wurde in allen Positionen erfüllt.

4. Darstellung der Innovationspotentiale und Applikationsmöglichkeiten

(Wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung, Anwendungspotential, Anwendungsbereiche in der mittelständischen Wirtschaft; Darlegung der Ergebnisverwertung (eigene Nutzung, Technologietransfer, Know-how-Verkäufe u.a.); Perspektive und Chancen für sich anschließende Entwicklungsarbeiten; Darlegung der Applikationsmöglichkeiten für die mittelständische Industrie)

Die im Vermarktungskonzept des Projektantrages gemachten Aussagen sind weiterhin zutreffend:

Zitat:

Darstellung der Zielmärkte

Zielmarkt für spektrale Regler ist der Bereich spezifischer, high-end Schweißverfahren für Spezialverbindungen (legierte Stähle, Mischverbindungen). Es sind Spezialverfahren (zum Beispiel im Flugzeug- oder Motorenbau) adressiert, bei denen besonderer Wert auf höchste Qualität gelegt wird. Sei es, daß bei Legierungen spezifische Abkühlnormen (z.B. T85) zum Schutz vor Versprödung oder Mikrokristallbildung einzuhalten sind, daß bei verzinktem Stahlblech die Zinkverdampfung minimiert werden soll, daß Sichtnähte zu schweißen sind, die optische Anforderungen erfüllen müssen oder daß geringste Nahtfehler nicht entstehen dürfen.

Wettbewerbssituation

Weltweit wird an der Einführung spektraler Methoden gearbeitet. Mit dem antragstellenden Team stehen insbesondere ein französisches und mehrere chinesisch dominierte Teams im Wettstreit, siehe Literaturverzeichnis in der ausführlichen Beschreibung. Bei Google Scholar³ erhält man für das französische Team unter dem Suchbegriff „mirapeix spectral methods for arc welding“ 32 Treffer. Suche nach „chinese spectral methods for arc welding“ ergibt 1480 Treffer.

Die Stärken dieser Teams liegen in hoher Mannstärke und in hervorragender Fachkompetenz. Die Schwächen konkurrierender Teams liegen derzeit in sehr schmal ausgerichteter und wenig anwendungsorientierter Forschung. So ist es wohl nur zu erklären, daß gerade uns im Team mit INP Greifswald und TU Berlin mit der Untersuchung der Zeitfunktionen von Gruppenspektren 2007 ein erster Durchbruch⁴ bei der industriellen Erschließung spektraler Sensorik gelang.

In der Verbindung von drei Kompetenzrichtungen (Schweißingenieurwesen, theoretische Physik, Elektronik/Informatik) zeigten wir 2007 den ersten, in Echtzeit (unter 100 µs) regelnden Spektralregler zur Begrenzung der Metaldampfkonzentration im Plasma, siehe ausf. Beschreibung, Bild 7. Mit dieser Leistung gelang es prinzipiell erstmalig, die Möglichkeit aufzuzeigen, praktikable und kleine Spektralregler zu bauen, die industrielle Einsatzreife erlangen können.

³ Suchmaschine <http://scholar.google.de>

⁴ Spektralregler für Metaldampfkonzentration: DVS-Abicor-Preis 2008, Patent WO2010/025709 A8

Insofern erscheint die Wettbewerbssituation recht entspannt. Allerdings wurde von uns zu gefundenen Lösungen veröffentlicht (Patent und andere; siehe ausf. Beschreibung [1]...[15]). Damit ist der Zeitvorsprung begrenzt auf wenige Jahre. Inzwischen ist bekannt, daß auch andere Teams weltweit begonnen haben, an Liniengruppen zu arbeiten.

Mit dem Projekt wird eine informatisch neue Herangehensweise an spektrale Regelungen erfolgen. Mit dem beabsichtigten Projektergebnis soll die Möglichkeit geschaffen werden, eine Vielzahl spektraler Verfahren sehr unaufwendig per Software laden zu können. Es wäre zu erwarten, daß sich die Wettbewerbssituation dadurch weiter entspannt, da noch keine vergleichbaren Aktivitäten konkurrierender Teams bekannt sind.

(Zitat Ende)

Die im Projektantrag genannten, wirtschaftlichen Parameter (Marktgröße, Erzeugniskalkulation etc.) werden mit dem Projektergebnis real. Im Projektverlauf wurden keine Tatsachen bekannt, die eine neue Interpretation der dort vorgenommenen Markteinschätzung ermöglichen würden.

Über den Einsatz für Pulsschweißen hinaus sind Einsatzfälle denkbar, bei denen Temperaturen sehr schnell zu messen sind, wie zum Beispiel beim Laserschweißen oder im Kurzlichtbogen.

Darlegung der Ergebnisverwertung

(eigene Nutzung, Technologietransfer, Know-how-Verkäufe u.a.)

Noch im März wird es vor Vertretern der deutschen Schweißindustrie und Projektpartnern eine erste Vorführung der Ergebnisse geben. Es wird angestrebt, den Firmen im Rahmen von Kooperationsvereinbarungen den uneingeschränkten Zugang zu allen Projektergebnissen (Leiterkarten im Gerber-Format, C-Quellen, Experimentierset Ion) zu gestatten. In Abhängigkeit vom jeweiligen Interesse werden spezifische Vereinbarungen zu treffen sein. Zunächst wird den Firmen ein Experimentierset, bestehend aus Ion (ionOS) und Windows-Software Lion angeboten, damit eigene Experimente und Verifikationen erfolgen können. Es ist zu hoffen, daß die Präsentation dazu führt, daß der eine oder andere Geschäftsführer einen Bankkredit riskiert, um die neue Technik in seine Schweißmaschinen-Produktlinie einfließen zu lassen. Skepsis gegenüber neuen Techniken ist immer berechtigt. Um so wichtiger ist es, bei deren Einführung behutsam und vertrauensvoll zu agieren. Gegenseitiges Vertrauen und gegenseitige Rücksichtnahme sind Grundlage jeder Produktinnovation. Insofern sind an der GFal Schritte erforderlich, die eine Begleitung investierender Firmen bis zur Marktpräsentation gestatten.

5. Angaben zu erworbenen bzw. angemeldeten Schutzrechten für Vorhabensergebnisse

Die Darstellungen aus dem Projektantrag sind weiter zutreffend. Neue Erkenntnisse gab es nicht.

Zitat aus dem Antrag:

Darstellung der patentrechtlichen Situation

Einfache Lageregelungen mit Photodioden wurden zwischen 1960 und 1980 patentiert und sind abgelaufen.

Ein Verfahren zur Minimierung und Regelung der Metaldampfkonzentration wurde patentrechtlich geschützt, siehe [7], [8].

Ein linienspektrometrischer Ansatz wurde ebenfalls an der TU Berlin geschützt [16].

International besitzen die Patente [68] und [97] einen gewissen Bezug zum Projekt.

Da bislang kaum über Liniengruppen und deren Nutzung für die Lichtbogeninspektion geforscht wird, ist die patentrechtliche Seite des Projekts eher als frei einzuschätzen.

Das Konzept der im Projekt entstehenden Reglerklasse ist wahrscheinlich schutzwürdig.

Um die deutsche Industrie zu schützen, ist nach einer hinreichenden Erprobungs- und Einführungszeit vorgesehen, ein nicht ausschließliches Patent zu erwirken, welches an interessierte Firmen vergeben werden kann.

(Ende des Zitats)

Eine Patentierung „ist nach einer hinreichenden Erprobungs- und Einführungszeit vorgesehen“. Zunächst ist die Resonanz der deutschen Schweißindustrie bei der Systemvorstellung im März abzuwarten. Möglicherweise gibt es dort Vorschläge zur vorteilhaften Ausformung des Verfahrens. Die deutsche Schweißgeräte- Industrie ist an eine Patentierung interessiert. Man hat kein Interesse an fernöstlichen Nachbauten, die den deutschen Markt mit einer deutschen Erfindung überschwemmen würden.

6. Zusammenstellung aller erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen

(Artikel in Zeitschriften, Seminare, Schulungen, Vorträge, Messen, Ausstellungen, Präsentationen)

Auf der GFal-Seite (Internet) wird es unverbindliche Informationen zum Projektabschluß geben. Eine Erstveröffentlichung ist zusammen mit den Erprobungshelfern vom INP Greifswald in einer deutschsprachigen, schweißtechnischen Fachzeitschrift geplant. Mit interessierten, deutschen Herstellern vom Schweißmaschinen stehen wir in engem Kontakt. Diese werden per Email permanent informiert.

Zuviel internationale Aufmerksamkeit ist zur Zeit nicht ratsam, dazu ist es zu früh. Wir stehen derzeit etwa drei Jahre vor einer Produkteinführung.

- [1] Gött, G., Schöpp, H., Hofmann, F. Heinz, G.: Improvement of the control of a gas metal arc welding process. 2010 Meas. Sci. Technol. (MST), Vol. 21, Nr. 2, Febr. 2010, (7pp)
- [2] Heinz, Gerd ; Hofmann, Frank ; Schöpp, Heinz ; Gött, Gregor: Echtzeit-Spektralregler für Impulsschweißmaschinen. Schweißen und Schneiden 61 (2009), S. 144-150
- [3] Heinz, G., Schöpp, H., Gött, G., Reich, S. : Projekt Spektral geregelte Pulsschweißmaschinen (SPS), BMWi/AiF 15649BG. Zwischenberichte 2009 in Teilen GFal/INP/TUB <http://www.gfai.de/projekte/spspsba/index.html>
- [4] DVS/Abicor-Innovationspreis 2008 für Spektralregler. Team Heinz/Hofmann/Schöpp/Gött. Verliehen auf der „Großen, Schweißtechnischen Tagung des DVS“ in Dresden, 17.-19.9.2008
- [5] Heinz, G., Hofmann, F., Gött, G., Schöpp, H.: Spectral Control for Pulsed Arc Welding. Material Science and Engineering (MSE08), 1.-4. September 2008, Nürnberg Congress Center
- [6] Heinz, G., Schöpp, H., Gött, G., Reich, S. : Projekt Spektral geregelte Pulsschweißmaschinen (SPS), BMWi/AiF 15649BG. Zwischenberichte 2008 in Teilen GFal/INP/TUB <http://www.gfai.de/projekte/spspsba/index.html>
- [7] Heinz, G., Schöpp, H., Hofmann, F., Gött, G.: Verfahren zum Regeln eines Energieeintrags eines Pulslichtbogenplasmas bei einem Fügeprozess und Vorrichtung . Patentanmeldung PCT/DE2009/001216 vom 3.9.2009
- [8] Heinz, G., Schöpp, H., Hofmann, F., Gött, G.: Verfahren zum Regeln eines Energieeintrags eines Pulslichtbogenplasmas bei einem Fügeprozess und Vorrichtung . Patentanmeldung DE102008045501A1 3.9.2008, OS vom 04.03.2010, <http://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE102008045501A1>
- [9] Heinz, G., Hofmann, F., Schöpp, H., Gött, G.: Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralsensitiver Sensorik (Gepulste Lichtbogenfügeprozesse/ Optispek). Projektabschlußbericht. BMWi/AiF-Projekt IGF 14607BG vom 01.02.06 - 31.12.07

- [10] Heinz, G., Schöpp, H., Gött, G., Dorn, L., Hofmann, F.: Optimierung des Energieeintrags gepulster Lichtbogenfügeprozesse mittels spektralsensitiver Sensorik. BMWi/AiF-Projekt IGF 14607 BG, Zwischenbericht v. 13.3.2007
- [11] Metzke, E; Langula, M; Goecke, S; Spille-Kohoff, A: Prozessoptimierende Regelung für das ChopArc-Schweißen im Ultraleichtbau. DVS-Berichte Band 237 (2005) Seite 38-43
- [12] Heinz, G.: Dynamische Untersuchung von Pulslichtbogen mit 6-Kanal Spektrometer. GFal-Bericht 17.1.2007 http://www.gfai.de/~heinz/techdocs/bericht_2007_01_17.pdf
- [13] Heinz, G.: Zur Selektivität breitbandiger Photodioden. GFal-Bericht vom 9.2.2007 unter http://www.gfai.de/~heinz/techdocs/bericht_2007_02_09.pdf
- [14] Heinz, G.: Kennlinien-Plottprogramm für handelsübliche Photodioden unter Scilab 3.1.1. <http://www.gfai.de/~heinz/techdocs/index.htm>
- [15] Heinz, G.: Beschreibungen Champ6v11. <http://www.gfai.de/~heinz/techdocs/index.htm>
- [16] [19] Heinz, G. DAC 2x4 Bit Zeitfunktionsgenerator mit Atmel ATtiny261A. <http://www.gfai.de/~heinz/techdocs/index.htm#dac>
- [17] Heinz, G. Downloadbereich „Spektral gesteuerte Pulsschweißmaschinen“ <http://www.gfai.de/spspba/index.html> (Passwort DAsTg4-j3)

7. Danksagung

Mein Dank gilt allen Beteiligten und Helfern. Ein besonderes Dankeschön geht an Herrn Warmbier und seinen Mitarbeiter der Firma Carl-Cloos-Schweißtechnik GmbH für Unterstützungen jeglicher Art. Mein Dank geht an Marc Hübner und Frank Hoffmann von EWM HIGHTEC WELDING GmbH für verschiedenste Ratschläge und Hilfen. Zu danken ist Axel Gröhling von der GFal, der in einer zeitlich kritischen Phase in die Entwicklung der Windows-Software Lion einsprang. Unser Dank gilt den Mitarbeitern des Institut für Plasmaphysik Greifswald Dr. Heinz Schöpp und Gregor Gött, die bei der Erprobung mit ihrer Schweißmaschine Cloos-Quinto GLC403 uneigennützig halfen. Nicht zuletzt gilt mein Dank dem Geschäftsführer und dem Vorstandsvorsitzenden der GFal, Dr. Frank Weckend und Prof. Dr. Alfred Iwainisky für vielfache Unterstützung und Motivation.

Die Zielstellungen des Projekts wurden erreicht, die Projektarbeiten wurden erfolgreich und ohne Verzögerung durchgeführt. Es sind keine Umstände bekannt geworden, die den Erfolg des Projekts in Frage stellen.

Berlin, den 28. Feb. 2013

Gerd Heinz, Projektleiter