Entwicklung eines Messgeräts zur parallelen Messung von Blattstreckungsraten von mono- und dikotylen Kulturpflanzen unter Bedingungen variabler Wasserversorgung für den Feldeinsatz

Diplomarbeit

für die

Diplomprüfung

zur

Erlangung des Grades: Diplom-Agraringenieur (Dipl.-Ing. agr.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu

Bonn

Vorgelegt am: 31.03.2009

Von cand. agr. Jens Christian Heck

1. Prüfer: Prof. Dr. Heiner E. Goldbach

2. Prüfer: Prof. Dr. Mathias Becker

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

1.1 Problemstellung ... 3

1.2 Zielsetzung ... 6

2 Das Messgerät 7

2.1 Anforderungen ... 7

2.1.1 Allgemeine Anforderungen ... 7

2.1.2 Spezielle Anforderungen ... 8

2.1.3 Grundüberlegungen zur Konstruktion ... 9

2.2 Komponentenwahl ... 10

2.2.1 Sensoren ... 11

2.2.2 Analog/Digital-Wandler ... 14

2.2.3 Buscontroller zur Kommunikation Master/Slave ... 16

2.2.4 Embedded Multitasking Computer für die Master- und Slave-Platinen 18

2.2.5 System am Master zur Datensammlung und Datenübergabe ... 22

2.2.6 System am Master zur Überprüfung der laufenden Messung (debug) . 24

2.3 Konstruktion und Bedienung ... 25

2.3.1 Entwicklung ... 25

2.3.2 Slaveplatine ... 31

2.3.3 Masterplatine ... 32

2.3.4 Software ... 33

2.3.5 Bedienungshinweise ... 33

3 Praktischer Einsatz des Messgeräts 38

3.1 Feldtauglichkeit ... 38

3.2 Optimierungsmaßnahmen ... 41

3.2.1 Klammereigenschaften ... 41

3.2.2 Federzugkorrektur ... 43

3.2.3 Störende Effekte bei der Datenauswertung ... 48

3.3 Abschließende Untersuchung im Gewächshaus ... 51

3.3.1 Versuchsbeschreibung ... 51

3.3.2 Versuchsergebnisse ... 54

3.3.3 Diskussion ... 57

4 Ausblick 59

5 Zusammenfassung 60

6 Literatur 61

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Blattlängenwachstum bedeutet eine irreversible Zunahme der Blattfläche und damit des photosynthetisch aktiven Teils der Pflanze.

Das Blattwachstum ist bei monokotylen Pflanzen hauptsächlich im Längenwachstum des Blatts definiert. Es werden Zellen im Basalmeristem am Blattgrund gebildet, in der Streckungszone wachsen diese bei Vakuolenbildung und Wasseraufnahme in die Länge, bis sie schließlich die Differenzierungszone erreichen und photosynthetisch aktiv werden. Dicotyle Pflanzen entwickeln Blätter hingegen aus Primordien. Eine zeitliche oder räumliche Differenzierung von Zellteilung und Zellstreckung ist in der Regel nicht möglich. Durch Cytokinese werden kontinuierlich Zellen gebildet, die sich sowohl in ihrer Länge als auch Breite ausdehnen. Am Rand des Blatts ist die Region der Ausdifferenzierung lokalisiert. **(Kutschera 2002)**

Das Wachstum junger Pflanzen lässt sich in drei Wachstumsphasen gliedern: Zellteilung im Meristem, Zellstreckung und Ausdifferenzierung. In der Phase der Zellsteckung ist das Blattlängenwachstumsrate (engl. Leaf Elongation Rate LER) am höchsten. Wachstumsgeschwindigkeiten von mehreren mm/h Zuwachs werden gemessen.

Das Blattwachstum reagiert sensitiv auf die Blatttemperatur sowie Luft- und Bodenfeuchte **(Watts 1972)**. Die Wasserversorgung nimmt eine entscheidende Rolle im Blattlängenwachstum ein. Das Fluten von Pflanzen kann zu einem stark verstärkten Blattlängenwachstum führen. Ebenso können Trockenheit oder verdichteter Boden zu vermindertem Blattlängenwachstum führen. Eine Änderung der Versorgungsbedingungen führt binnen Minuten zu einer Änderung der Blattstreckungsrate (LER) **(Banga 1995; Young 1997)**. Tritt bei Pflanzen Wasserstress auf, beispielsweise wenn die Wasserabgabe durch Transpiration die Wasseraufnahme, bedingt durch geringe Wasserverfügbarkeit im Boden oder gehemmter Stoffwechsel der Wurzel, übersteigt, kommt es zunächst zu einer Abnahme des osmotisch gebunden Wassers aus den Vakuolen. Schon geringe Wasserabgaben führen zu einem erheblichen Abfall des hydrostatischen Drucks und die Zellstreckung wird rasch eingestellt. Enzymatische Reaktionen werden unter diesen Bedingungen nur unwesentlich beeinflusst. Die Stoffwechselvorgänge der Pflanzen, wie Photosynthese und CO_2-Assimilation, laufen zunächst weiter. Erst bei zunehmendem Wasserstress (Blattwasserpotentiale < -7 bis -16 bar, artabhängig)

beginnen sich die Stomata zu schließen und die weitere Wasserabgabe, aber auch die CO_2-Aufnahme, werden minimiert (Abbildung 1).

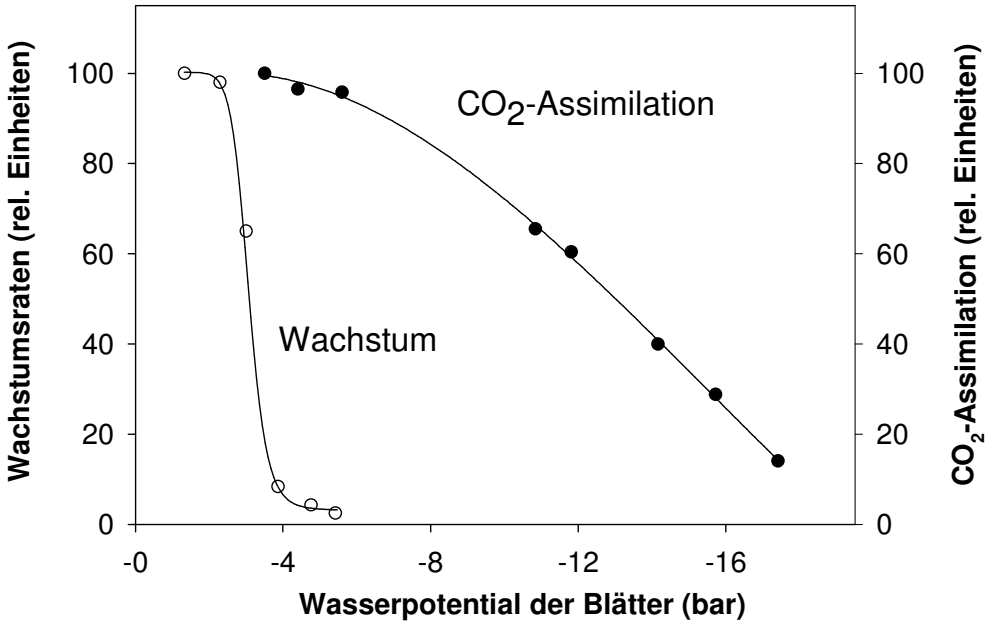


Abbildung 1: Einfluss eines fallenden Wasserpotentials auf das Blattwachstum und die CO_2-Assimilation von Sonnenblumenblättern (nach Boyer 1970, verändert).

Das Blattwachstum reagiert sehr sensitiv auf Veränderungen exogener Faktoren. Veränderungen im Blattlängenwachstum zeigen direkt physiologisch relevante Änderungen bei diesen Faktoren an.

Das Blattwachstum kann mit Hilfe destruktiver oder nicht-destruktiver Techniken erfasst werden. Die Erfassung von Längenveränderungen mit Hilfe von Maßstäben wie Linealen, ist ein probater Weg und findet auch in der aktuellen Literatur als eine schnelle Methode zur Bewertung großer Pflanzenbestände Verwendung **(Walter und Schurr 1999)**. Eine Vermessung von Wachstum räumlicher Art für das Blatt wird in der Literatur bereits sehr früh, wie zum Beispiel durch **Avery (1933)**, beschrieben. Dabei wurden Tintenpunkte auf die Organe aufgebracht und mit einem Lineal vermessen.

Spezielle Messgeräte für das Blattlängenwachstum (Axanometer) existieren bereits seit dem 19. Jahrhundert und funktionieren nach dem Prinzip der mechanischen Signalverstärkung mittels Rollen und Hebel (Abbildung 2).

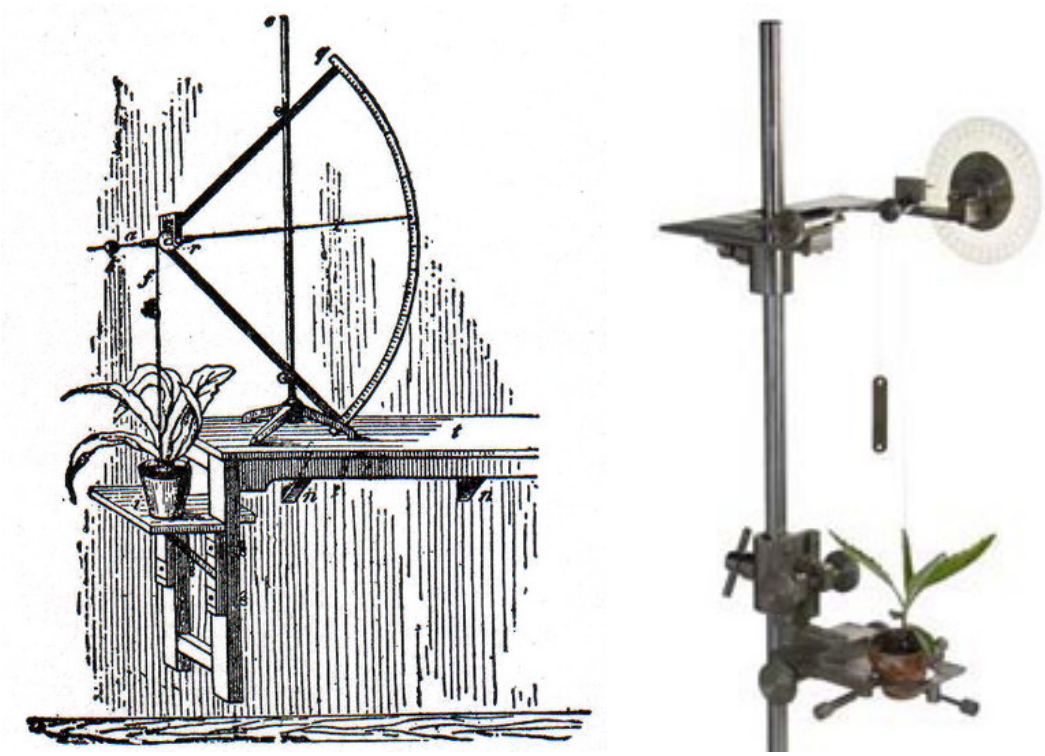


Abbildung 2: Messapparatur zur Bestimmung des Blattlängenwachstums (Auxanometer) aus dem 19. Jahrhundert (links). Torsions–Auxanometer aus dem Jahr 1934 (rechts).

Automatische, zeitlich hoch aufgelöste Methoden stehen seit den 70er Jahren zur Verfügung, als in größerem Maßstab elektronische Hilfsmittel einsetzbar wurden **(Watts 1972)**; LVDTs (linear variable differential transducers) registrieren dabei die Positionsveränderung der zuwachsenden Blattspitze mit Hilfe eines an sie befestigten Regulierungselementes. Methoden, die zeitlich und räumlich eine hohe Auflösung bieten, standen bislang nicht zur Verfügung; auch war die Auswertung der Daten selten in automatisierter Form möglich, sodass nur wenige Datensätze im Verlauf einer Studie erhoben werden konnten.

Die Messung von Änderungen des Wachstums von Pflanzen in räumlicher sowie zeitlicher Dimension unter variablen Umweltbedingungen setzt Messungen in einem minutengenauen Bereich bei Messgenauigkeiten im Mikrometerbereich voraus. Abbildung 1 verdeutlicht, welch kleine Faktoränderungen, wie beim Wasserpotential der Blätter, zu großen Änderungen der LER führen können.

Feldtauglichkeit ist bei den aktuellen Geräten nicht oder nur sehr eingeschränkt gegeben. Deswegen bedarf es hier der Entwicklung eines entsprechenden, an die speziellen und nicht unkritischen Anforderungen des Freilandversuchs, angepassten automatischen Auxanometers.

1.2 Zielsetzung

Zur Bestimmung des Blattlängenwachstums soll, sowohl zeitlich als auch räumlich hoch auflösend, ein automatisches, feldtaugliches Messgerät entwickelt werden. Dieses soll in der Lage sein, parallel und zeitgleich Messungen an möglichst vielen verschiedenen Varianten durchzuführen. Das Blattlängenmessgerät (Auxanometer) soll sowohl für den Einsatz an monokotylen als auch an dikotylen Pflanzen geeignet sein.

Dabei dürfen die Entwicklungskosten auf der einen Seite und die Materialkosten auf der anderen Seite ein vorgegebenes Budget nicht überschreiten.

Die Arbeit wurde im Rahmen des BAtroS-Verbundprojektes „Bodenmelioration und Anbauverfahren für trockenheitsgefährdete Standorte“ durchgeführt.

2 Das Messgerät

2.1 Anforderungen

Aus der Zielsetzung der Arbeit, nämlich ein automatisches feldtaugliches Messgerät zu entwickeln, das geeignet, ist nicht invasiv und parallel das Blattlängenwachstums an verschiedenen mono- und dikotylen Pflanzen zu bestimmen, ergeben sich eine Reihe von allgemeinen und speziellen Anforderungen, die hier zunächst erläutert werden.

2.1.1 Allgemeine Anforderungen

Die automatische Messung des Blattlängenwachstums erfolgt mit Sensoren, deren Daten über mehrere Tage erfasst, gespeichert und in regelmäßigen Abständen abgerufen werden können. Die Erfassung des Blattlängenwachstums erfolgt mit einer ausreichend hohen metrischen und zeitlichen Auflösung und einer reproduzierbaren Genauigkeit.

Es soll möglich sein, Blattstreckungsraten (LER) in den Größenordnungen von mm/Tag bis zu dm/Tag in möglichst kurzen Zeitintervallen zu messen, wobei die untere Grenze bei einer Messung im Minutentakt liegen sollte, um auch kurzfristige Ereignisse wie Bewässerung, Beleuchtung, Düngung oder andere Stresseinflüsse erfassen zu können.

Das Messgerät soll die Blattstreckungsraten verschiedener monokotyler als auch dikotyler Pflanzen erfassen können, muss also an unterschiedliche phänotypische Gegebenheiten auch unter Feldbedingungen anzupassen sein.

Der Einsatz im Versuchswesen macht es erforderlich, dass mehrere Varianten in einer ausreichenden Zahl von Wiederholungen unter gleichen Bedingungen gemessen werden können. Wünschenswert wäre ein System, das bis zu 21 Messungen (Sensoren) parallel durchführen kann.

2.1.2 Spezielle Anforderungen

Besondere Anforderungen an das Gerät ergeben sich aus der Frage nach der Feldtauglichkeit. Hier sind Punkte wie mobile Energieversorgung zu nennen. Es muss gewährleistet sein, dass man an allen Messpunkten bei höchster Messfrequenz Tagesgänge im Blattlängenwachstum aufzeichnen kann. Das heißt, dass auf der einen Seite energiesparende Verfahren verwendet werden müssen, auf der anderen Seite muss das Gerät an leicht verfügbare Energiequellen anschließbar sein. Weiter muss mit Qualitätsschwankungen (zum Beispiel fortschreitende Entladung des Akkumulators) dieser Energiequelle gerechnet werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Feldtauglichkeit ist die Wassergeschütztheit der Gerätekomponenten. Besonders in Getreidebeständen muss man mit hohen Luftfeuchtigkeiten jenseits des Kondensationspunkts rechnen.

Die Anforderung, Tagesgänge des Blattlängenwachstums auf dem Feld zu messen, birgt das nicht unerhebliche Problem von Temperaturschwankungen. Dies soll sich im Vergleich zu Standardbedingungen möglichst wenig auf die Präzision des Geräts auswirken. Zumal davon ausgegangen werden muss, dass nicht an allen Messpunkten die gleichen Umgebungsbedingungen vorherrschen.

Eine weitere nicht unerhebliche Herausforderung der Feldtauglichkeit stellt die Luftstromstabilität dar. Eine Messwertänderung ist schon durch sehr kleine Bewegungen am Blatt zu sehen.

Die Anforderung, das Gerät in Feldversuchen einsetzen zu können, beinhaltet, dass die einzelnen Messstellen aufgrund der Randomisierung der Versuchsparzellen recht unterschiedlich weit auseinander liegen können. Als extremer Fall wird hier ein Abstand von ca. 200 m zwischen den zu messenden Parzellen angenommen.

Um die Blattstreckungsraten verschiedener monokotyler und dikotyler Pflanzen erfassen können, muss das Messsystem dem jeweiligen Habitus der Testpflanzen anzupassen sein. Es muss entsprechend dem Alter der Pflanzern „mitwachsen“ können und somit einfach zu installieren und zu justieren sein.

2.1.3 Grundüberlegungen zur Konstruktion

Das Messgerät im BatroS-Projekt sollte für den Einsatz in einem Feldversuch geeignet sein, dabei können die Versuchsparzellen aufgrund der Randomisierung unterschiedlich weit auseinander liegen. Bis zu ca. 200 m Abstand zwischen den zu messenden Parzellen sind dabei zu überbrücken. Aus dieser Voraussetzung ergab sich die Idee, das Messgerät modular aufzubauen und via Datenbus zu verbinden. Dies birgt die Vorteile, Kabellängen zu sparen, Leitungsverluste zu minimieren, die Daten zentral erfassen zu können und den Bus je nach Fragestellung frei verlängern zu können oder Stationen einfach zu entfernen.

Das Messsystem besteht aus den Sensoren zur Datenerhebung sowie einer Einheit zur Datenumwandlung, -weiterleitung und -speicherung. Letztes Gerät besteht aus zwei Komponenten. Die erste Komponente ist der zentrale Teil des Messgeräts, weiter als „Master“ bezeichnet. Die zweite Komponente sind die einzelnen Messplatinen, weiter „Slave“ genannt, die mit den einzelnen Sensoren verbunden werden. Der Master erfüllt die Funktion der Bereitstellung einer stabilen Energieversorgung der einzelnen Messplatinen, fährt das gewählte Messprogramm ab, regelt den Datenverkehr auf dem Bus zwischen den angeschlossenen Komponenten und speichert die Daten der angeschlossenen Komponenten auf einer Speicherkarte. Die Slave-Platinen erfüllen die Funktion, die analog gemessenen Daten der Sensoren in digitale Daten umzusetzen und an den Master zu schicken.

Die Hauptproblematik bei der Handhabung der Sensoren ist, dass die zu messenden Schwankungen sehr klein sind. Schwankungen in der Spannungsversorgung, lange, vor allem unterschiedlich lange Leitungen, machen sich bemerkbar. Ebenso Faktoren wie zum Beispiel Temperaturänderungen. Dies führte zur Idee, je Versuchsparzelle eine eigene Logik zu konstruieren, die auf Anfrage des Masters eine Messung von bis zu vier anschließbaren Sensoren durchführt und die erhobenen Messwerte bereits auf der Platine des Slaves in digital verarbeitbare Daten mit Hilfe eines sehr präzisen Analog/Digital-Wandlers umsetzt.

2.2 Komponentenwahl

Durch die Anforderungen, an das Messgerät und durch die getroffenen Grundüberlegungen gab es eine recht eingeschränkte Auswahlmöglichkeit an verwendbaren Komponenten. Es mussten verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Zunächst natürlich die technischen Anforderungen an das Gerät, aber auch das verfügbare Budget und der Aufwand der Realisation spielen eine wichtige Rolle. Die Qualität des Geräts im Sinne von Präzision und Linearität hatten höchste Priorität. Die Sensoren stellten den größten finanziellen Posten dar. Diese kommen auf über 50 % des Gesamtbudgets.

Ein weiterer wichtiger Zusammenhang ist, dass viele integrierte Schaltkreise ziemlich günstig in der Anschaffung sind, wenn man die umgebende Elektronik selbst aufbaut oder Umwege in Kauf nimmt, wie zum Beispiel das detaillierte Programmieren des Zugriffs auf das Dateisystem des Speichermediums. Ist man gewillt, etwas mehr auszugeben, erhält man weitgehend fertige Lösungen, die getestet und deutlich einfacher zu verarbeiten sind.

Komponenten von wichtiger Bedeutung für das Projekt sind:

- Sensoren zur Blattlängenmessung
- Analog/Digital-Wandler
- Embedded Multitasking Computer für die Master- und Slave-Platinen
- Buscontroller zur Kommunikation Master/Slave
- System am Master zur Datensammlung und Übergabe
- System am Master zur Überprüfung der laufenden Messung (debug)

2.2.1 Sensoren

Das Design des Messgeräts wurde so gewählt, dass es prinzipiell möglich ist, eine ganze Reihe verschiedenartiger Messsensoren an die Slave-Platinen anzuschließen.

Gängige Sensortypen von verschiedenen Herstellern zur Längenmessung werden im Folgenden stichwortartig beschrieben

Induktive Wegaufnehmer

- Messbereiche: 2 - 600 mm
- Genauigkeit: 0,1 % - 0,3 %
- Auflösung: 5 - 200 µm
- Ausgänge: 5 V, 10 V, bipolar, 4-20 mA
- Berührend durch Taster oder Stößel

Abbildung 3: Induktive Wegufnehmer

Linearpotentiometer

- Messbereiche: 10 - 2000 mm
- Genauigkeit: 0,0 5% - 0,2 %
- Auflösung: Quasi unendlich
- Ausgänge: potentiometrisch
- Berührend durch Taster/Stößel/Schlitten/Ring

Abbildung 4: Linearpotentiometer

Laser Triangulation

- Messbereiche: 0,5 - 800 mm
- Genauigkeit: 2 - 2000 µm
- Auflösung: 1 - 100 µm
- Berührungslos durch Laser-Triangulation

Abbildung 5: Sensor mit Laser Triangulation

Seilzug-Wegaufnehmer

- Messbereiche: 50 - 50000 mm
- Genauigkeit: 0,05 % - 0,25 %
- Auflösung: Quasi unendlich
- Ausgänge: 10 V, 4-20 mA, A/B/Z, SSI, CAN, Parallel
- Berührende Messung durch Seilauszug

Abbildung 6: Seilzug-Wegaufnehmer

Die Entscheidung, welche Sensoren zu verwenden sind, fiel auf die Seilzugwegaufnehmer. Der Seilzugwegaufnehmer ist eine Bauform eines Potentiometergebers (Abbildung 7). Ein Potentiometergeber ist ein Positionssensor nach der Bauart eines Potentiometers. Er misst bei gestreckter Bauform die Länge, bei runder Bauform den Winkel.

Entsprechend der Stellung des beweglichen Teils (Schleifer) ändert sich der elektrische Widerstand zwischen Schleifer und den Enden. Schaltet man den Geber als Spannungsteiler, erhält man somit eine sich relativ zur Stellung ändernde elektrische Spannung.

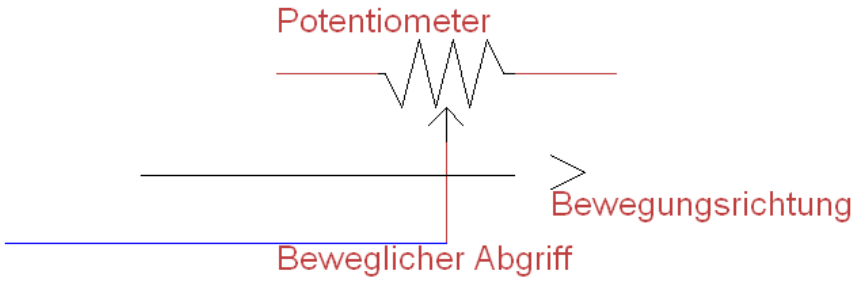


Abbildung 7: Prinzipdarstellung eines Potentiometergebers

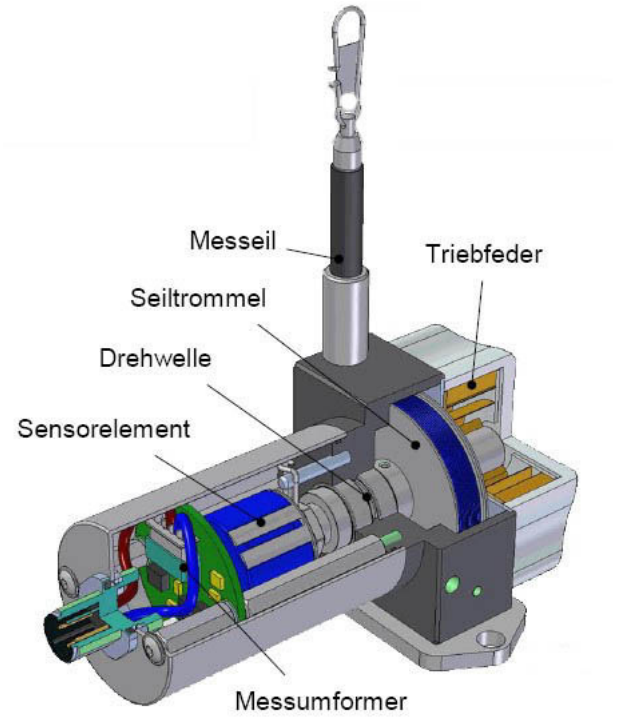


Abbildung 8: Zeichnung eines Seilzug-Wegaufnehmers

Die Vorteile eines Seilzug-Wegaufnehmers lassen sich wie folgt beschreiben:

- Ausreichend genau in der Messung
- Kompakte Bauform
- Günstiger Preis
- Direkt einsetzbar ohne Konstruktionsaufwand im Feld (durch integrierten Zugmechanismus)

2.2.2 Analog/Digital-Wandler

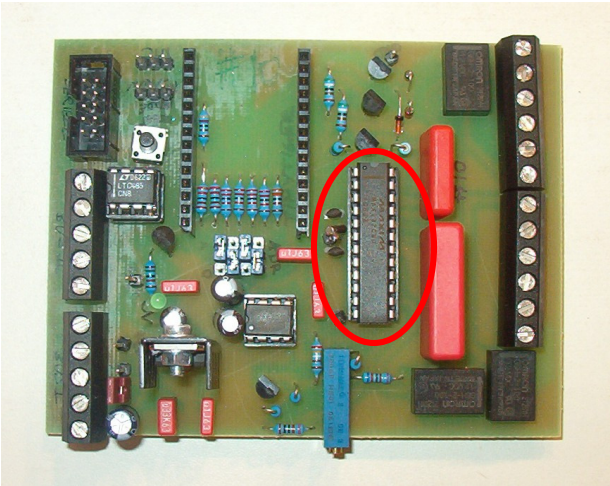


Abbildung 9: Slaveplatine mit Analog/Digital-Wandler (ADC)

Der Analog/Digital-Wandler (ADC) ist neben den Sensoren das Herzstück des Messgeräts. Die analog und damit quasi unendlich genau gesammelten Daten werden hier in maschinenverarbeitbare Zahlen umgewandelt. Vor der Umwandlung besteht die Gefahr, dass Einflüsse wie Störstrahlung, zum Beispiel durch ein Mobiltelefon, die tatsächlich gemessenen Werte mitunter stark verändern.

Bei der Planung des Messgeräts wurde unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Gerät speziell der **MAXIM 132 ADC** ausgewählt.

Es gibt verschiedene technische Verfahren, um analoge Daten in digitale Daten zu wandeln. Zwei kamen prinzipiell in Frage:

Das erste mögliche Verfahren bezeichnet man als ein Single-Slope-Umsetzer. Man beschreibt das Funktionsprinzip auch als „Sägezahnverfahren“. Dabei wird die Ausgangsspannung eines Sägezahngenerators über zwei Komparatoren mit dem Massepotential (0 V) und mit der ADC-Eingangsspannung verglichen. Während des Zeitraums, in dem die Sägezahnspannung den Bereich zwischen 0 V und der ADC-Eingangsspannung durchläuft, werden die Pulse eines Quarzoszillators durch einen Zähler summiert. Aufgrund der konstanten Steigung der Sägezahnspannung ist die verstrichene Zeit und somit der Zählerstand bei Erreichen von Gleichheit der Ausgangsspannung des Sägezahngenerators mit der ADC-Eingangsspannung proportional zur Höhe der ADC-Eingangsspannung. Nach dem Ende des Zählvorgangs wird das Zählergebnis in ein Register übertragen und steht als digitales Signal zur Verfügung. Anschließend wird der Zähler zurückgesetzt und ein neuer Umsetzungsvorgang beginnt.

Die Umsetzungszeit bei diesem ADC ist abhängig von der Eingangsspannung. Zeitlich schnell veränderliche Signale können mit diesem Umsetzertyp nicht korrekt umgesetzt werden. Umsetzer nach dem Sägezahnverfahren sind sehr ungenau, da der Sägezahngenerator mit Hilfe eines temperatur- und alterungsabhängigen Integrationskondensators arbeitet.

Das zweite Verfahren zum Single-Slope-Umsetzer bezeichnet man als Multislope-Umsetzer. Dieses besteht im Wesentlichen aus einem Integrator und mehreren elektronischen Schaltern. Der Integrator arbeitet mit einem externen, hochwertigen Kondensator, der in mehreren Zyklen geladen und entladen wird. Zunächst wird der Integratoreingang mit der unbekannten ADC-Eingangsspannung verbunden und es erfolgt die Ladung über ein fest vorgegebenes Zeitintervall. Für die anschließende Entladung wird der Integrator mit einer bekannten Referenzspannung entgegengesetzter Polarität verbunden. Die benötigte Entladezeit bis zum Erreichen von Null am Integratorausgang wird durch einen Zähler ermittelt und daraus die unbekannte Eingangsspannung bestimmt. Zur Kompensation von internen Offsetfehlern des ADC wird beim Vierrampenverfahren noch ein weiterer Lade-/Entladezyklus bei kurzgeschlossenem Integratoreingang durchgeführt. Die Referenzspannung muss immer konstant gehalten werden, das heißt beispielsweise, dass thermisch bedingte Schwankungen vermieden werden müssen.

Derartige Umsetzer nach dem Mehrrampenverfahren sind relativ langsam (hohe Konversionsdauer), benötigen keine Abtast-Halte-Schaltung und bieten eine sehr hohe Auflösung sowie gute differentielle Linearität und gute Unterdrückung von Störsignalen wie Rauschen oder Netzeinkopplung.

Eine wichtige Maßzahl bezüglich der Güte eines ADCs ist die Anzahl der Bits, mit denen gewandelt wird. In diesen Fall wurde sich für ein 18 Bit ADC entschieden. 18 Bit heißt hier, dass es 2^{18} Quantisierungsstufen gibt, in die die analogen Messwerte entsprechend eingeteilt werden. Das bedeutet, dass die 15 cm Seillänge der Sensoren auf 2^{18} Stufen aufgeteilt werden. Somit ergibt sich eine theoretische Genauigkeit von 150 mm/2^{18} Stufen = 0,000572 mm/Stufe. Dies ist sinnvoll, um den möglichen Quantisierungsfehler (Abbildung 10) so klein wie möglich zu halten. Werden Sensoren mit längeren Seilzügen verwendet, verringert sich die theoretische Empfindlichkeit natürlich entsprechend.

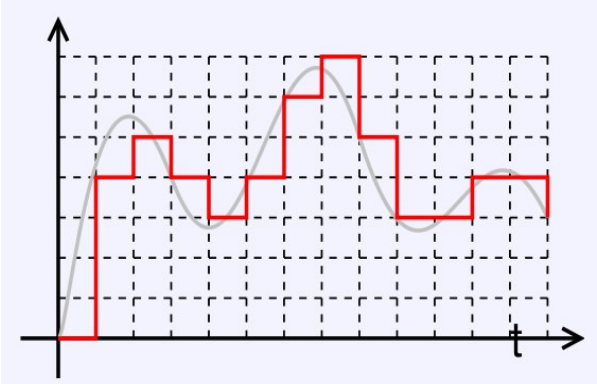


Abbildung 10: Prinzipdarstellung des Quantifizierungsfehlers

Der **Maxim 132 ADC** bietet für den Einsatz im Messgerät beste Voraussetzungen:

- Funktion mit dem sehr präzisen Multi-Slope-Prinzip
- 2^{18} Quantisierungsstufen
- Stromsparend im Betrieb (60 µA) und im Sleep-Mode (1 µA)
- Serielle Kommunikation mit dem Embedded Multitasking Computer

2.2.3 Buscontroller zur Kommunikation Master/Slave

Der Buscontroller ist die Komponente, die es den Messplatinen (Slave) ermöglicht, mit der Masterplatine zu kommunizieren. Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten der Kommunikation der Geräte untereinander. Für das Gerät und die daran gestellten Anforderungen ist ein Bussystem (Abbildung 11) sehr geeignet.

Abbildung 11: Prinzipdarstellung eines Bussystems

Die Daten in einem Bus können in beide Richtungen übertragen werden. Vorteile eines Busnetzes sind der geringe Kabelbedarf und die Unabhängigkeit von der Funktion einzelner Stationen: Beim Ausfall einer Station bleibt das gesamte System trotzdem intakt. Größte Gefahr ist ein Kabelbruch im Hauptkabel, durch den der ganze Bus ausfällt. Durch die Nutzung nur eines Kabels kann es zu Datenkollisionen kommen, die die Datenübertragung durch erneute Sendeversuche verlangsamen. Dies kann hier vernachlässigt werden, da die Datenmengen beim Messsystem vergleichbar klein und die Anzahl der sendenden Stationen überschaubar ist.

Es wurde sich hier für einen Feldbus entschieden. Feldbussysteme können sich über einen Bereich von mehreren hundert Metern erstrecken. Ein Feldbus ist ein industrielles Kommunikationssystem, das eine Vielzahl von Feldgeräten wie zum Beispiel Messfühler (Sensoren) mit einem Steuerungsgerät verbindet. Die Feldbustechnik wurde in den 1980er Jahren entwickelt, um die bis dahin übliche Parallelverdrahtung binärer Signale (hoher Verkabelungsaufwand) sowie die analoge Signalübertragung (Qualitätsverluste) durch digitale Übertragungstechnik zu ersetzen.

Um für Feldversuche geeignet zu sein, wurde für das Messgerät ein Kommunikationscontroller nach dem Standart RS-485 beziehungsweise EIA-485 gegeben. Das genaue Modell heißt LTC485, von der Firma Linear Technology (Abbildung 12).

Die EIA-485 Schnittstelle benutzt in der Regel nur ein Adernpaar und wird halbduplex betrieben, mit zwei Adernpaaren ist aber auch Vollduplexbetrieb möglich. Für die Zwecke des Messgeräts reicht der Halbduplexbetrieb jedoch völlig aus. Die Verbindung ist multipointfähig, das heißt es können bis zu 32 „Teilnehmer“ an den EIA-485-Bus angeschlossen werden. Aufgrund der symmetrischen Signalübertragung ist EIA-485 durch eine hohe Toleranz gegenüber elektromagnetischen Störungen gekennzeichnet. Üblich werden Kabellängen bis zu 1,2 km und Übertragungsraten bis 20 MBit/s unterstützt, wobei die maximale Übertragungsrate nur bei Leitungslängen von bis zu 12 m erreicht wird. Die tatsächlich mögliche maximale Netzwerkgröße und die maximale Übertragungsrate sind außerdem stark vom Aufbau des Netzwerks abhängig.

Die nötige Zweidrahtleitung sollte aus einer abgeschirmten und verdrillten Leitung bestehen und einen Wellenwiderstand von 100 Ohm aufweisen (normales Fernmeldekabel). Um Reflektionen bei der Datenübertragung zu verhindern sollte die Leitung (zumindest bei größeren Leitungslängen bzw. größeren Übertragungsraten) an beiden Endpunkten abgeschlossen sein. Dazu verwendet man einen Widerstand der genau so groß ist wie der Wellenwiderstand der Leitung. Somit ergibt sich, dass

jeweils ein Widerstand von 100 Ohm am Ende und am Anfang der Leitung parallel geschaltet werden muss.

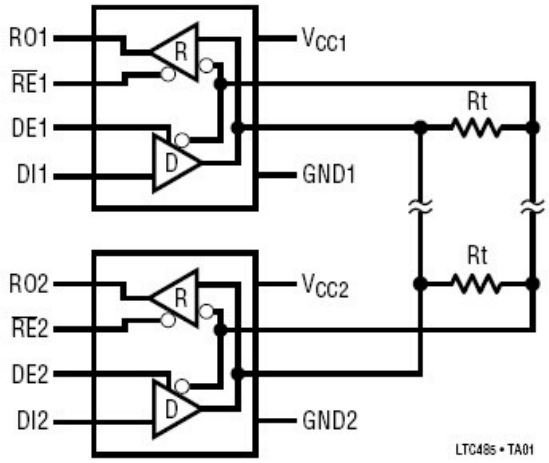


Abbildung 12: Funktion des LTC 485

Vorteile des LTC485 auf einen Blick:

- Hohe Buslänge möglich
- Keine besonderen Ansprüche an das Verkabelungsmaterial, außer bei Ausreizung der Standards
- Robuste Signale
- Verlustfreie, weil digitale Übertragung
- Variable Anzahl an Stationen
- Stromsparender Betrieb

2.2.4 Embedded Multitasking Computer für die Master- und Slave-Platinen

Der Ausdruck embedded system bezeichnet einen elektronischen Rechner oder auch Computer, der in einen technischen Kontext eingebunden (eingebettet) ist. Dabei hat der Rechner die Aufgabe, das System, in das er eingebettet ist, zu steuern, zu regeln oder zu überwachen.

Eingebettete Systeme verrichten – für den Benutzer weitgehend unsichtbar– den Dienst in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen und Geräten, zum Beispiel in Waschmaschinen, DVD-Playern oder Mobiltelefonen.

Oft werden eingebettete Systeme speziell an eine Aufgabe angepasst. Aus Kostengründen wird eine optimierte, gemischte Hardware-Software-Implementierung gewählt. Dabei vereinigt eine solche Konstruktion die große Flexibilität von Software mit der Leistungsfähigkeit der Hardware. Die Software dient dabei sowohl zur Steuerung des Systems selbst, als auch zur Interaktion des Systems mit der Außenwelt über definierte Schnittstellen oder Protokolle wie zum Beispiel Feldbus, RS232 oder über Ethernet.

Auf den Platinen an der Messparzelle, also den Slaveplatinen, muss ein Rechner installiert sein, der folgende Ansprüche erfüllt:

- Datenverkehr zwischen Master und Slave regeln
- Den ADC auslesen
- Die Sensoren steuern
- Plausibilitätsprüfung der gesendeten Daten (Checksumme bilden und prüfen)
- Optional: Umgebungstemperatur ermitteln
- Optional: Mittelwerte aus Messwerten bilden

Dies alles muss im ungünstigsten Fall gleichzeitig möglich sein. Deshalb ist es sinnvoll, einen Embedded **Multitasking** Computer zu wählen. Dieser kann flexibel auf die Anforderungen seiner Umwelt reagieren und ist nicht an einen starren Programmablauf gebunden. Dies bedeutet jedoch auch, dass man mit Ressourcen wie Arbeitsspeicher (RAM) und Programmspeicher (ROM) großzügiger planen muss, da man nicht genau vorhersagen kann, wann welcher Programmteil aktiv sein wird und wie viel Arbeitsspeicher dann gebraucht wird. Im Zweifel rechnet man mit der Summe aller Ansprüche aller relevanten Programmteile gleichzeitig und ermittelt so ein worst case Szenario. Dieses wird dann zu Grunde, gelegt um Abstürze oder anderes unvorhersehbares Verhalten der Hardware zu vermeiden.

Die Ansprüche des Embedded Multitasking Computer auf der Masterplatine sind ähnlich gelagert:

- Datenverkehr zwischen Master und Slaves regeln
- Vorhandensein der Slaves prüfen
- Empfangene Daten verarbeiten
- Empfangene Daten auf ein Speichermedium schreiben
- Plausibilitätsprüfungen der empfangenen und geschrieben Daten (Checksumme bilden und prüfen)
- Optional: Umgebungstemperatur ermitteln

Ein entsprechend potenten Embedded Multitasking Computer zu finden, ist als unkritisch zu erachten. Es bleiben ökonomische Fragen beziehungsweise Arbeitsaufwandsabschätzungen zu klären. Zwei verschiedene Wege können weiter beschritten werden: Es kann ein Embeddded Multitasking Computer ausgewählt werden, der in Assemblercode zu programmieren ist. Diese Embedded Multitasking Computer kosten ca. 30 % vergleichbarer Systeme, die mit einer Hochsprache wie zum Beispiel Basic zu programmieren sind. Die Systeme, welche per Hochsprache programmiert werden, sind zwar in der Regel weniger performant, werden aber mit einer kompletten Programmentwicklungsumgebung geliefert, was eine deutliche Arbeitszeitaufwandsersparnis bedeutet.

Am Beispiel der Programmierung der Rechner auf den Platinen kann dieser Zusammenhang kurz verdeutlicht werden.

Der Vorteil eines Assemblercode ist, dass von erfahrenen Programmierern geschriebene Assemblerprogramme fast immer deutlich schneller und kleiner sind als die Produkte der Hochsprachencompiler. Der Nutzen von Assembler liegt in dem Verstehen, wie ein System arbeitet und funktioniert, um damit in Hochsprachen umständliche Konstrukte zu vermeiden. Nachteile der Assemblerprogrammierung liegen im hohen Maße der Spezialisierung auf einen Prozessortyp (Abbildung 13).

Da Assemblerprogramme sehr hardwarenah geschrieben werden, weil die unterschiedlichen Spezifikationen der einzelnen Prozessorentypen individuell verschiedene Maschinencode-Befehlssätze erfordern, kann ein Assemblerprogramm nicht auf ein anderes Computersystem übertragen werden, ohne die Programmstruktur anzupassen. Das erfordert häufig ein komplettes Neuschreiben des Programmtextes. Im Gegensatz dazu muss bei Hochsprachen nur der Compiler individuell auf ein anderes Betriebssystem angepasst (neu geschrieben) werden, da dieser im Regelfall den Programmcode in eine für das Betriebssystem verwertbare Form umwandelt. Das Betriebssystem seinerseits übernimmt die Vermittlung zur Hardwareebene.

Das Programmieren in Assembler ist oft mit einer großen Anzahl an Einzelbefehlen verbunden, da häufig sehr kleine Informationseinheiten in einzelnen Speicherzellen manipuliert werden müssen. Würde man den Funktionsumfang eines einzelnen Hochsprachenbefehls in einer Assemblersprache realisieren wollen, entstünde dabei ein komplettes Programm (Tabelle 1). Auch kommt es bei der Entwicklung und dem Test von Assemblerprogrammen aufgrund von im Gegensatz zu Hochsprachen fehlenden Fehlerabfangroutinen häufig zu Verletzungen von geschützten Speicherbereichen, was zu schwer zu dokumentierenden Systemabstürzen führen kann.

Tabelle 1: Programmierbeispiel zum Drucken von „Hallo Welt!“.

Assembler Code	Basic Code

DATA SEGMENT
Meldung db "Hallo Welt!"
db "$"
DATA ENDS
CODE SEGMENT
ASSUME CS:CODE,DS:DATA
Anfang
mov ax, DATA
mov ds, ax
mov dx, offset Meldung
mov ah, 09h
int 21h
mov ax, 4C00h
int 21h
CODE ENDS
END Anfang
	10 PRINT "Hallo Welt!"

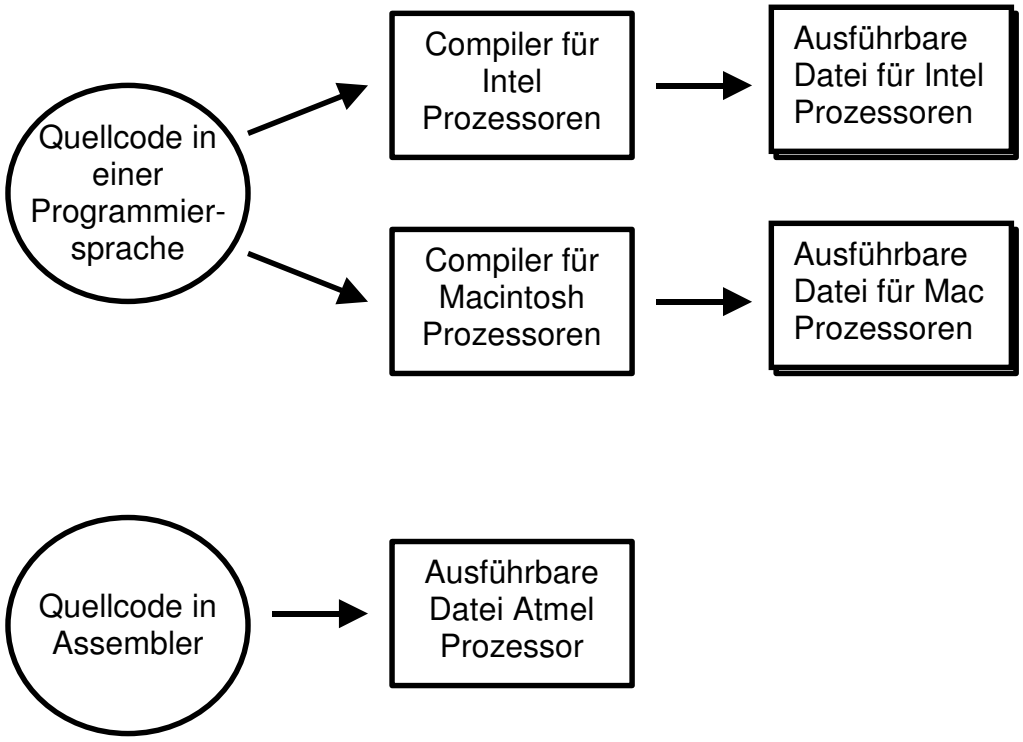


Abbildung 13: Assemblerprogrammierung versus Sprachenprogrammierung

Aus den Anforderungen und den ökonomischen Randüberlegungen heraus fiel die Wahl des Embedded Multitasking Computers auf den **ECONO Tiger Typ ENN-4/4** mit 512 Kbyte Arbeitsspeicher (RAM) und 512 Kbyte Flashspeicher (ROM) der Firma Wilke Technology.

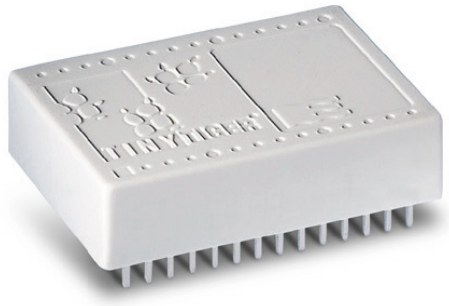


Abbildung 14: Embedded Multitasking Computer, Typ ECONO Tiger

Das Modell ECONO Tiger bietet mehrere Vorteile:

- Einfache Programmierung mit Basic möglich
- Stromsparmodi
- Vergleichsweise günstiger Einkaufspreis
- Wenig anspruchsvoll in der Art der Stromversorgung
- Wenig abhängig von Umweltfaktoren
- 24 universelle Input/Output-Anschlüsse
- 4 analoge Eingänge mit kleinem ADC
- 2 RS-232 Schnittstellen

2.2.5 System am Master zur Datensammlung und Datenübergabe

Eine besondere Herausforderung stellte die Frage nach der Form der Datensammlung dar. Nach einigen Überlegungen bezüglich Anforderungen, Bedienbarkeit, Implementierungsaufwand und Kosten entstand die Idee, die gesammelten Daten auf ein handelübliches CompactFlash-Medium zu schreiben. Gleichzeitig wird auf das Medium eine Konfigurationsdatei gelegt, um festzulegen, wie oft das Messgerät welche Sensoren misst. So wird die Konstruktion sowohl mechanisch als auch technisch einfacher.

Die Vorteile sind dabei vielfältig:

- Auf dem Feld ist ein einfacher Medienwechsel möglich, ohne andere Geräte wie ein Notebook zu benötigen.
- Einfacher und schneller Medienwechsel ist ohne lange Messunterbrechungen möglich.
- Die Medien sind handelsüblich, günstig und sicher.
- Kosten und vor allem Aufwand für ein Display und eine Eingabemöglichkeit am Gerät entfallen.
- Die Speicherung an zentraler Stelle in direkt verarbeitbarer Form.
- Einfachere Abdichtung des Gehäuses des Geräts
- Der Flashspeicher nutzt sich ab. Er wird nach einigen tausend Schreibvorgängen fehlerhaft werden. Ist aber leicht zu erneuern.
- Speichermedien sind hardware- und betriebssystemunabhängig lesbar und beschreibbar.

Im Detail fiel die Wahl auf das **CF-Modul Typ M3248** von Avisaro (Abbildung 15). Dieses Modul ist für den industriellen Einsatz gedacht und ist via RS232 direkt vom ECONO Tiger auf der Masterplatine anzusteuern. Dieses Modul birgt den großen Vorteil, die komplette logische Datenverwaltung selbstständig zu erledigen. Es kann also zum Beispiel per Befehl eine Datei angelegt und geöffnet werden, ohne dass man Faktoren wie das Dateisystem oder Datenverteilung auf dem Medium berücksichtigen müsste.

Abbildung 15: CompactFlash Modul Typ M3248 von Avisaro.

2.2.6 System am Master zur Überprüfung der laufenden Messung (debug)

Da das Messgerät kein Display hat, man aber dennoch unter Umständen überprüfen möchte, ob das Gerät innerhalb normaler Parameter funktioniert, gibt es einen RS232-Anschluss auf der Masterplatine. An diesem wird vom ECONO Tiger permanent ausgegeben, was er grade tut und ob der Prozess wie geplant abgeschlossen werden konnte.

Zum Lieferumfang des Messgeräts gehört ein RS232-Diagnosekabel (Abbildung 16).

Da aber gerade mobile Geräte wie zum Beispiel modernere Notebooks oft keine RS232 Schnittstellen mehr aufweisen, wurde zusätzlich ein Adapterkabel entworfen, welches den Anschluss des Messgeräts direkt an einen USB-Anschluss erlaubt. Herzstück dieses Adapters stellt der **Chip FT232R** von Future Technology Devices International Ltd. dar (Abbildung 17).

Für diesen wurde ein Treiber entwickelt, der es ermöglicht, das Messgerät an Windows 2000, Windows XP und Windows Vista zu betreiben. Die Ausgaben des Messgeräts können mit einem beliebigen Terminalprogramm betrachtet werden.

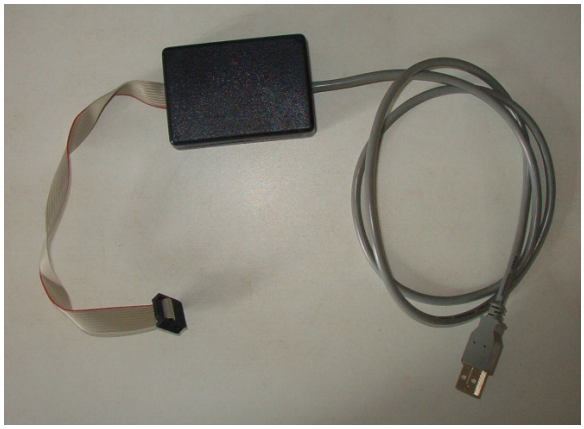


Abbildung 16: USB-Debug-Kabel

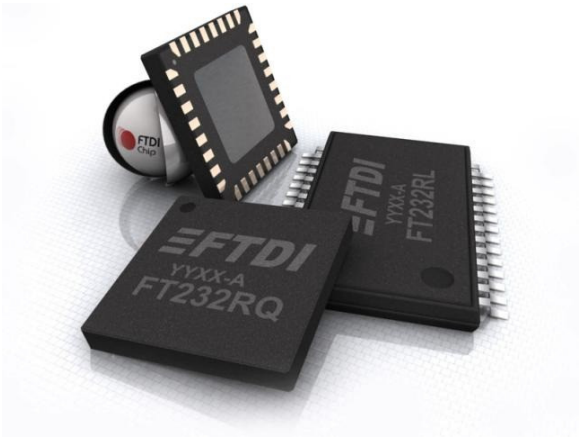


Abbildung 17: FTDI Chip

2.3 Konstruktion und Bedienung

2.3.1 Entwicklung

Der Anfang der praktischen Entwicklung war ein Board, auf dem man die prinzipielle Funktion der einzelnen Komponenten des zukünftigen Messgeräts testen konnte. Auf Abbildung 18 ist das erste Testboard zu sehen, welches zu diesem Zweck erstellt wurde. Dieses Board hat alle Funktionen, die Master und Slave auch haben. Außerdem ist es hier möglich, den ECONO Tiger zu programmieren. Die einzelnen Komponenten sind noch relativ weit von einander entfernt.

Anfangsschwierigkeiten wie unstabile Spannungsversorgung und Signalstörungen bei der Datenübertragung auf der Platine zwischen den Komponenten konnten lokalisiert und ausgemerzt werden. Besonders wichtig war die Erkenntnis, dass lange Leitungen eine Antennenwirkung haben und die Schaltung vermehrt anfällig machten gegenüber Störeinflüsse wie Strahlung eines Handys oder den simplen Vorgang des Lichteinschaltens. Vor allem Schaltungsteile, die den ADC betreffen, fallen hierbei ins Auge. Weiter wurde schnell klar, dass die beweglichen Teile zum Kalibrieren der Spannungen auf den Platinen hochqualitativ sein müssen, um die nötige Präzision halten zu können. Als der ADC – wenn auch sonderbare – Werte übermittelte, das Relais schaltete und am RS-485 Kommunikationsport Signale messbar waren, wurde der Prototyp einer Slaveplatine entworfen und getestet.

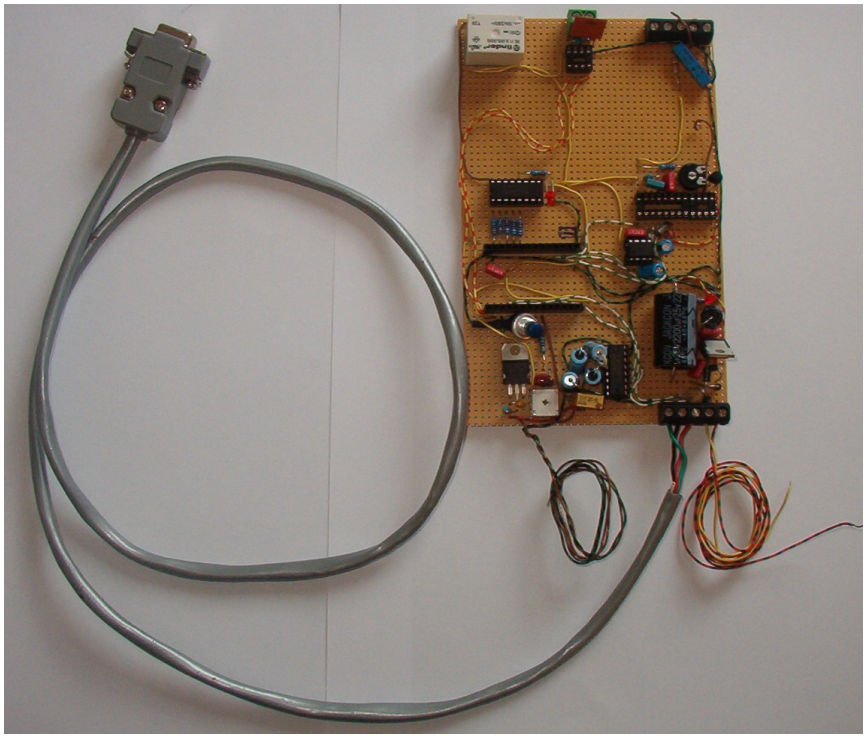


Abbildung 18: Das erste Testboard

Der Prototyp der Slaveplatine (Abbildung 20) ist auch nach Komponenten differenziert und hat vergleichsweise lange Leitungen. Jedoch war es so möglich, die Kommunikation zwischen Master und Slave zu testen. Da es verschiedene Probleme in der Kommunikation zwischen Master und Slave gab, wurde auch der Einsatz von Optokopplern (Abbildung 19, die weißen Komponenten) geprüft.

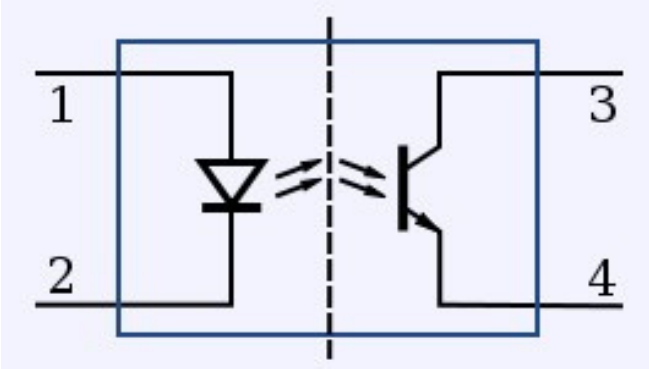


Abbildung 19: Funktionsprinzip eines Optokopplers

Optokoppler dienen zur Übertragung eines Signals bestehend aus einem meist Infrarotstrahlung emittierenden und einem die Strahlung empfangenden Bauelement. Beide Bauteile sind lichtgeschützt in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Überlegungen, die für den Einsatz von Optokopplern sprachen, waren zum einen die Master- und Slaveplatinen galvanisch zu trennen. Dies ist vor allem ein Schutz bei Überspannungsereignissen auf dem Bus. Ein anderer sinnvoller Punkt schien zu sein, ein möglichst Störungsfreies Signal zu erzeugen und so die Übertragungsqualität zu verbessern.

Letztlich wurden die Optokoppler nicht in das endgültige Design übernommen, weil sie auch Nachteile bergen. Neben den nicht ganz unerheblichen Kosten und einem erhöhten technischen Aufwand gibt es Frequenzbereiche, in denen Optokoppler nicht optimal arbeiten. Die Lösung des Problems beschränkte sich letztlich darauf, die Übertragenen Daten via Prüfsumme zu testen und die Übertragungsgeschwindigkeit zu senken.

Das Design des Prototyps der Slaveplatine machte auch noch einmal deutlich, dass ein wichtiges Ziel sein würde, die Leitungslängen, vor allem um den ADC herum, zu optimieren. Dies war zwar schon geschehen, jedoch stellte die schon erwähnte Antennenwirkung im Sinne von Störstrahlungsempfang ein kleineres Problem dar, nun war durch die engere Bauart auch eine gewisse Eigenstörung zu erkennen. Es wurde versucht, diese durch den Einsatz von einem Kupferdach über dem ADC abzuschirmen. Das erwies sich jedoch als teuer wie nutzlos.

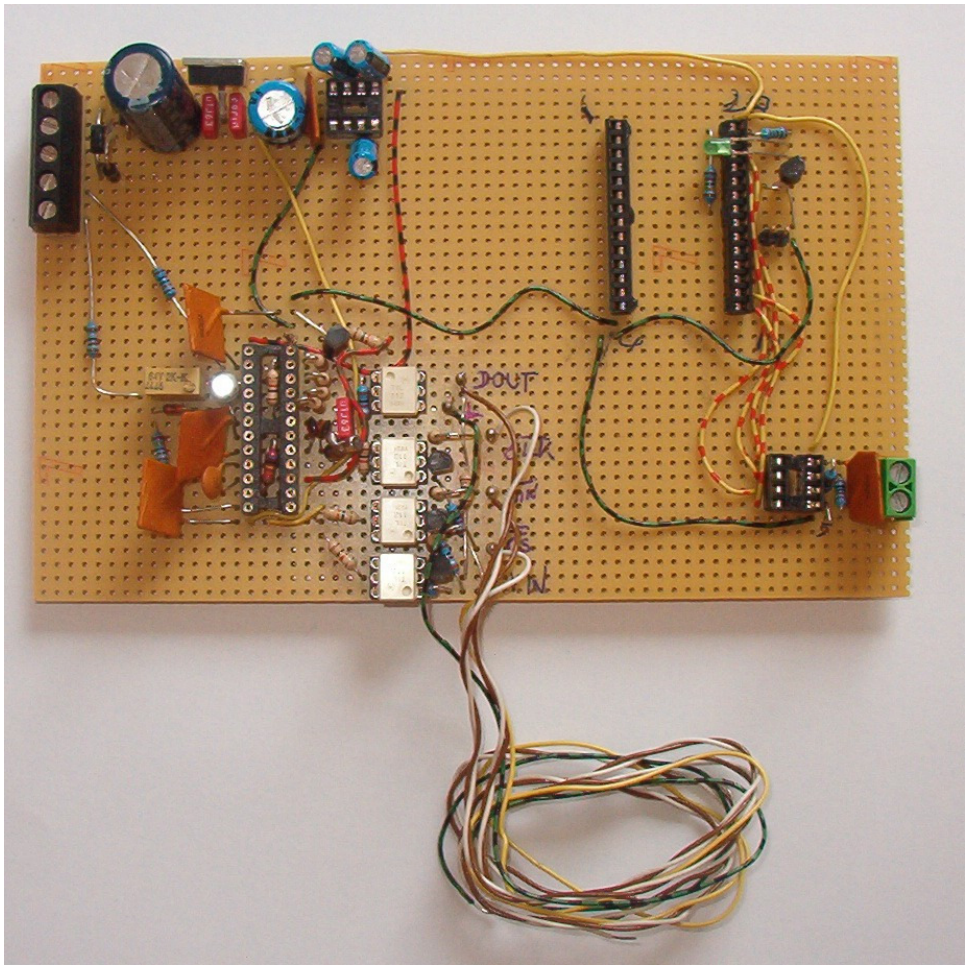


Abbildung 20: Erster Prototyp der Slaveplatine

Aus den gesammelten Erfahrungen mit dem Prototyp ergab sich dann das Platinenlayout für Master und Slave (Abbildung 21 und Abbildung 22).

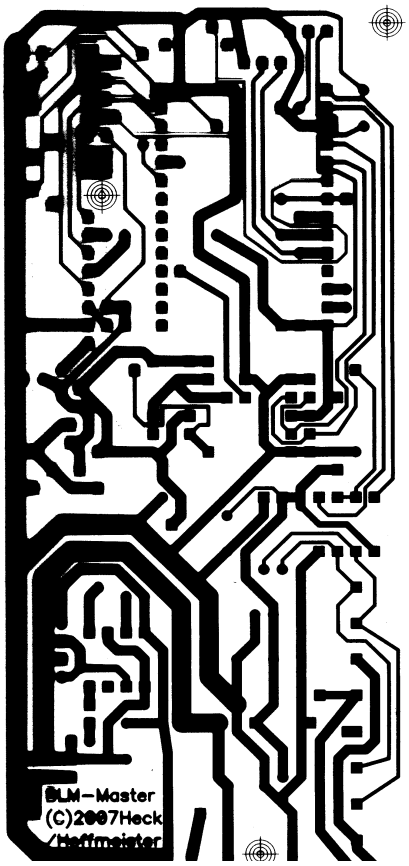


Abbildung 21: Platinenlayout der Masterplatine

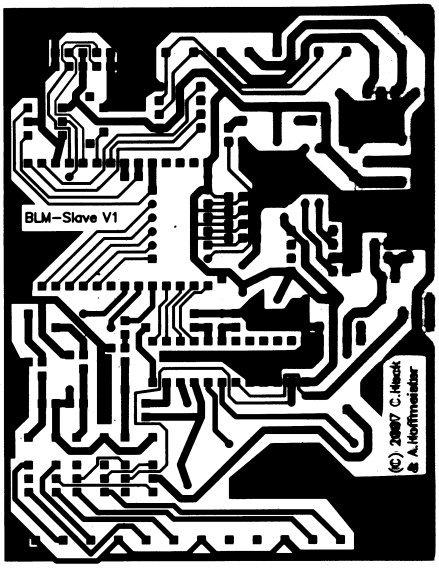


Abbildung 22: Platinenlayout der Slaveplatine

Die Platinen wurden bei der FH-Rhein-Sieg im Fachbereich Elektrotechnik belichtet, geätzt, gefräst und lackiert (Abbildung 23).

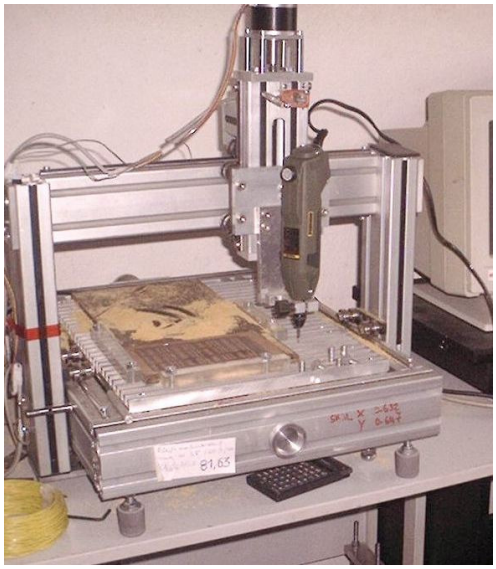


Abbildung 23: Leiterplattenfräsanlage der FH-Bonn-Rhein-Sieg

Damit war das Gerät von der elektronischen Seite quasi fertiggestellt. Blieb noch, die Software an die Gegebenheiten anzupassen und weitere Tests zu machen. Wie einen prinzipiellen Kommunikationstest (Abbildung 24). Dieser wurde zum Beispiel auch über mehrere Tage mit einem 200 m langen Kabel durchgeführt.

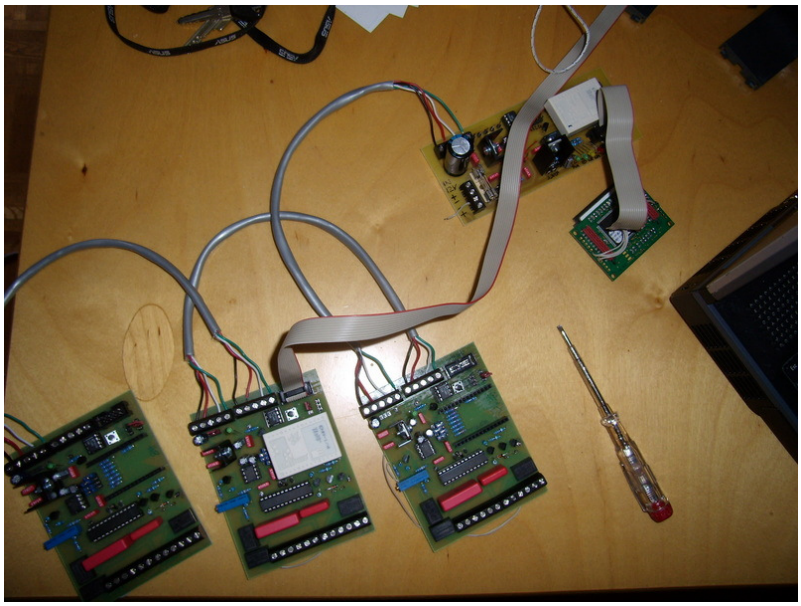


Abbildung 24: Kommunikationstest

Die Slaveplatinen bekamen ein spritzwasserfestes Gehäuse für den Feldeinsatz. Je drei Sensoren wurden an einen Slave angeschlossen. Sieben Slaves wurden in Handarbeit angefertigt.

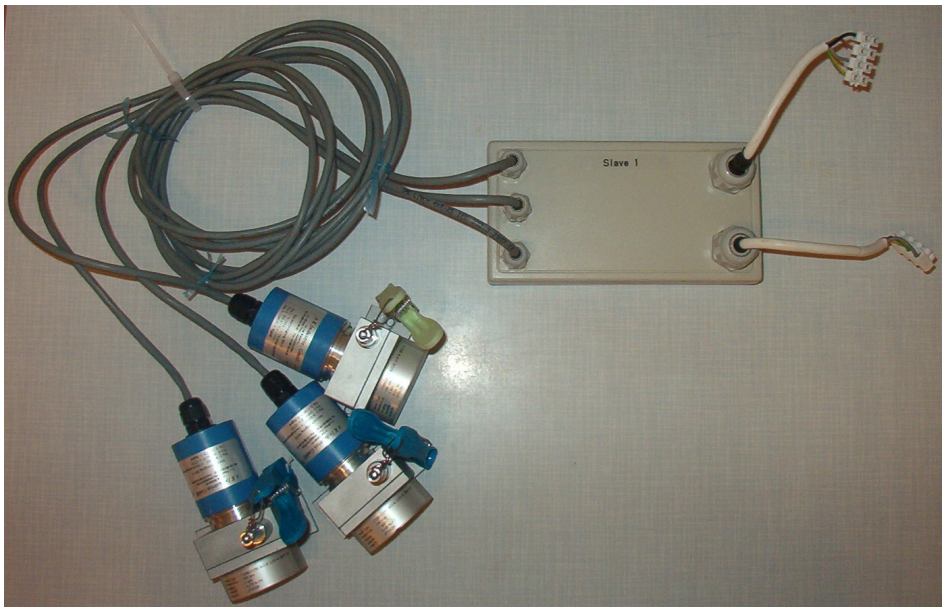


Abbildung 25: Slave im Gehäuse

2.3.2 Slaveplatine

Das Layout der Slaveplatine wurde Abbildung 22 entsprechend umgesetzt und entsprechend Abbildung 26 bestückt. Anschlüsse und Messpunkte sind in Tabelle 2 dokumentiert.

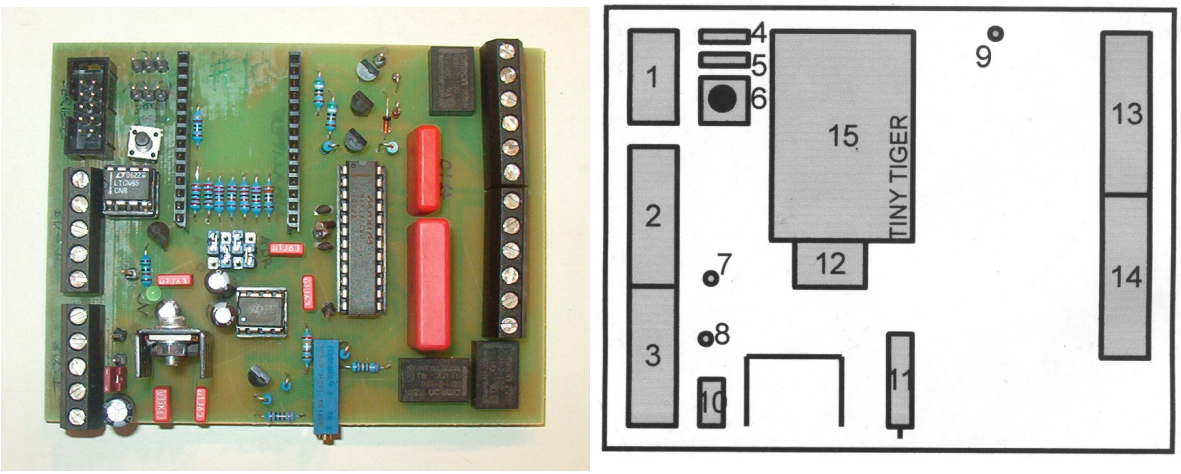


Abbildung 26: Slaveplatine mit Konzeptzeichnung

Tabelle 2: Hardwarekonfiguration Slave

Teil	Beschreibung der Funktion
1	Anschluss zum Programmieren des Tiny-Tigers
2 und 3	Anschluss für Stromversorgung und Feldbus (von oben nach unten): Pin 1: FeldbusPin 3: Permanent +12 V Pin 2: FeldbusPin 4 : 12 V+ Pin 5: Masse
4	optional: Anschluss für NTC (Temperaturfühler)
5	Jumper Betriebsmodus: 1-2: Normalmodus 2-3: Programmiermodus
6	Resetschalter
7	Messpunkt +5 V
8	Messpunkt +12 V
9	Messpunkt Masse
10	Jumper Energie (Master muss entsprechend konfiguriert sein): 1-2: Dauerbetrieb 2-3: Sparbetrieb
11	Mehrgangpotentiometer zum sehr exakten Einstellen der Referenzspannung des ADCs. Optimal: 655 mV. Pin 18 des ADC gegen Masse messen.
12	Adresswahl Slave (bis 15 möglich) Bedeutung der Jumper v.l.n.r.: 8-4-2-1; Addition ergibt Adresse.
13 und 14	Anschluss von bis zu vier Sensoren. (A,B,C,D) Pin 1, 4, 7,10: Masse Pin 2, 5, 8, 11: Schleifer Pin 3, 6, 9, 12: V+

2.3.3 Masterplatine

Abbildung 27 zeigt die Bestückung der Masterplatine. Tabelle 3 dokumentiert Anschlüsse und Status-LEDs.

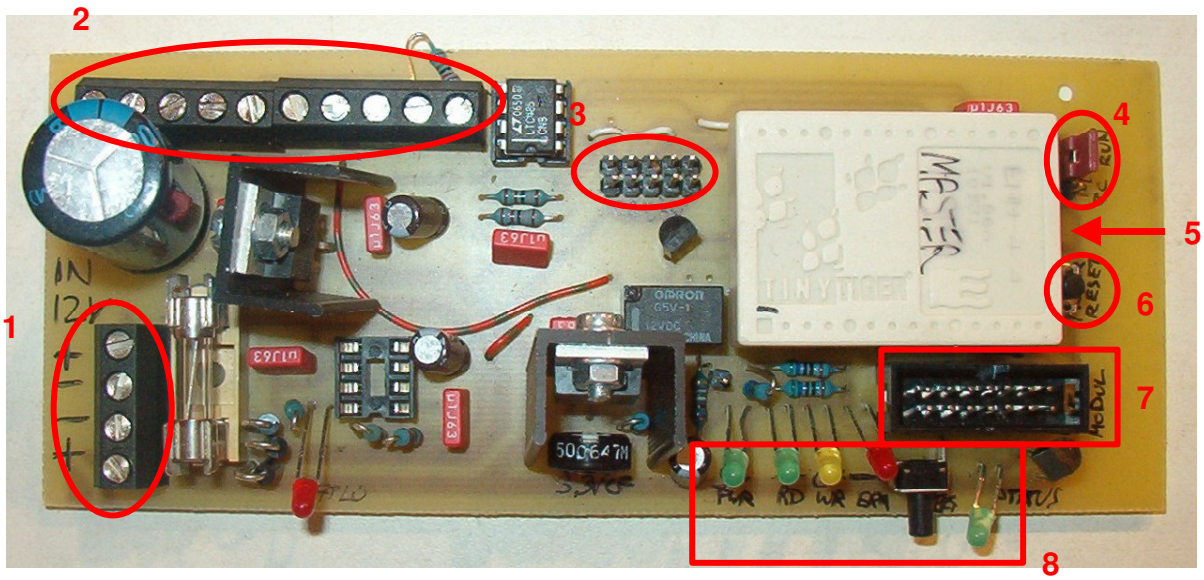


Abbildung 27: Photo Masterplatine

Tabelle 3: Hardwarekonfiguration Master

Teil	Beschreibung der Funktion
1	Stromversorgung 12 V
2	Anschlussleiste Feldbus Pin 1, 6: Masse Pin 2, 7: +12 V Pin 3, 8: Permanent +12 V Pin 4, 9: Feldbus Pin 5, 10: Feldbus
3	Anschluss für Debugkonsole RS-232/USB
4	Jumper Betriebsmodus: 1-2: Normalmodus 2-3: Programmiermodus
5	optional: Anschluss für NTC (Temperaturfühler)
6	Resetschalter
7	Anschluss CompactFlash-Modul
8	Status LEDs v.l.n.r.: Grün: Slave Power Grün: CompactFlash: Reading Gelb: CompactFlash: Writing Rot: CompactFlash: Error Grün: Status

2.3.4 Software

Sämtliche Softwarekomponenten zum Betrieb des Messgeräts, dazu zählen Firmware der Slaveplatinen, Firmware der Masterplatine und Treiber des USB-Debug-Kabels, wurden von Herrn Anselm Martin Hoffmeister geschrieben und sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

2.3.5 Bedienungshinweise

Inbetriebnahme:

Um mit dem Messgerät arbeiten zu können, sind nur wenige Handgriffe nötig.

Im Auslieferungszustand sind alle Slaveplatinen mit einer eindeutigen ID zwischen 1 und 15 versehen, sodass ein Öffnen der Slavegehäuse nicht nötig ist. Lediglich zur Feinkalibrierung des ADC ist dies nötig (Tabelle 2 Punkt 11).

Zunächst müssen die Sensoren an die Pflanze gebracht werden. In der Praxis haben sich dazu Wäscheklammern von dm mit Fensterdichtband von Tesa an den aufeinanderdrückenden Flächen bewährt (Abbildung 28). Hier wird ein günstiger Bereich gefunden, in dem das Blatt nicht durch die Klammer verletzt wird oder Blattspitzen abgerissen werden. Das Blatt ist aber auch nicht zu locker eingespannt, dass die Klammer nicht abrutscht.

Abbildung 28: Befestigung von Sensor an Blatt mit Detailansicht der abschließenden Sensorklammer (Peggy Perfect)

Als nächster Schritt empfiehlt es sich, mit der Busverkabelung fortzufahren. Der Bus läuft über ein vieradriges Kabel. Verpolungen sind unbedingt zu vermeiden, da sonst das Messgerät nicht funktioniert und beschädigt werden kann.

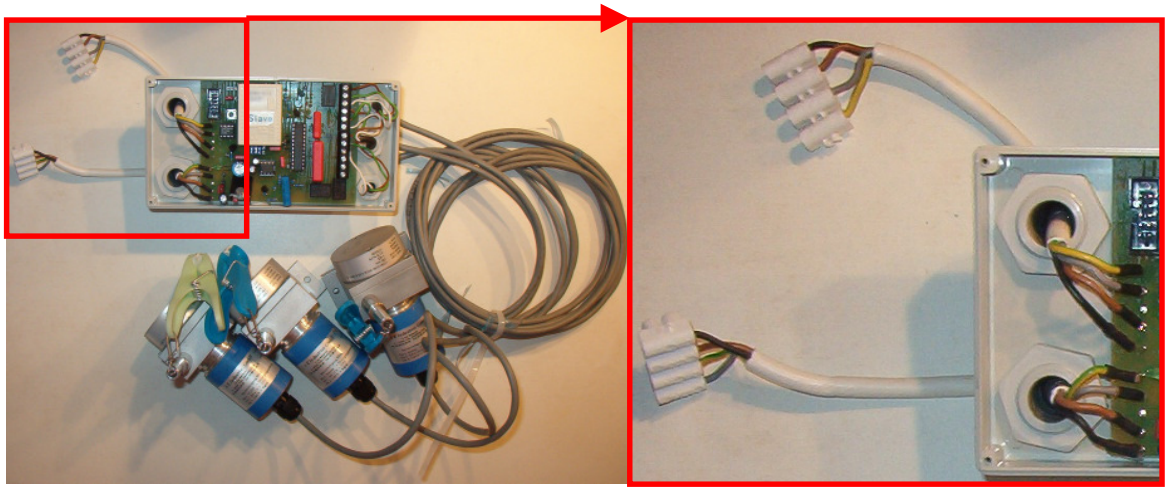


Abbildung 29: Offenes Slavegehäuse mit Detailvergrößerung

Der Anschluss im Auslieferungszustand ist wie in Tabelle 4 dargestellt zu verkabeln.

Tabelle 4: Belegungsplan Feldbus

Schwarz	Masse
Braun	12 V +
Grau	Feldbus Daten 1
Gelb/Grün	Feldbus Daten 2

Bei annähernder Ausreizung der maximalen Buslänge ist es ratsam, die Busenden jeweils mit einem 100 Ohm Widerstand zwischen Feldbus Daten 1 und Feldbus Daten 2 zu terminieren (vergleiche Abschnitt 2.2.3).

Der nächste Schritt ist nun die **Einstellung des Messgeräts am Master.** Dazu muss lediglich eine Konfigurationsdatei auf dem CompactFlash-Medium angelegt werden, um dem Master mitzuteilen, was man messen möchte. Die Konfigurationsdatei trägt den Namen config.txt und ist folgendermaßen aufgebaut:

datei datname
sensor 1 name_a
sensor 5 name_b
takt 60

Die erste Zeile benennt den Dateinamen für die anzulegende .csv-Datei. Das Dateiformat CSV beschreibt den Aufbau einer Textdatei zur Speicherung oder zum Austausch einfach strukturierter Daten. Die Dateiendung CSV ist eine Abkürzung für Comma-Separated Values. Ein allgemeiner Standard für das Dateiformat CSV existiert nicht. Jedoch wird es im RFC 4180 grundlegend beschrieben. Die zu verwendende Zeichenkodierung ist ebenso wenig festgelegt; 7-bit ASCII gilt weithin als der kleinste gemeinsame Nenner.

Bei jeder Konfigurationsänderung sollte hier ein neuer Dateiname vergeben werden, damit entsprechend auch die Spaltennamen neu vergeben werden. Der Dateiname sollte nur aus Buchstaben und Ziffern bestehen und darf maximal acht Zeichen lang sein. Eine Datei mit datname.log wird als Logdatei geführt, die Daten werden als datname.csv abgespeichert.

Diese Datei wird, falls nicht existent, neu angelegt und mit Spaltenüberschriften versehen. Wenn die Datei bereits existiert, passen die Spaltenüberschriften möglicherweise nicht zu den bereits vorliegenden Messwerten, daher sollte man wie erwähnt bei jeder Konfigurationsänderung einen neuen Dateinamen vergeben.

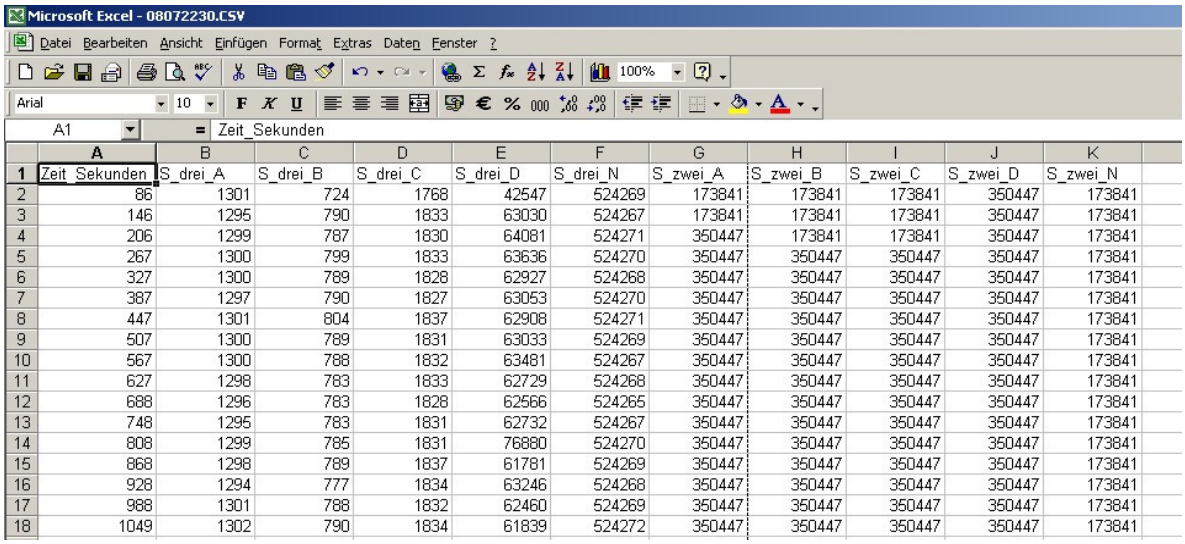
Danach folgt für jede angeschlossene Slave-Platine eine Zeile, die mit dem Schlüsselwort „sensor“ beginnt, dann „Leertaste Zahl Leertaste Name“, wobei die Zahl der Nummer der Slave-Einheit entspricht (wie dort auf das Gehäuse gedruckt), der Name sollte ausschließlich aus Buchstaben, Ziffern und dem Unterstrich bestehen, um Probleme bei der Spaltenzuordnung durch Excel zu vermeiden (insbesondere ein Komma, Semikolon, Doppelpunkt, Anführungszeichen oder Tabulator wären hier problematisch).

Die letzte Zeile sollte durch das Schlüsselwort „takt“ eingeleitet werden und gibt den Abstand zwischen zwei Messungen in Sekunden an. Die werte sollten zwischen 60 und 3600 liegen.

Alle Schlüsselworte müssen komplett aus Kleinbuchstaben bestehen, Tabulatoren statt Leerzeichen sind nicht zulässig. Abbildung 30 zeigt ein Beispiel einer Konfigurationsbeispiel. Hier werden die Slave-Einheiten 3 und 2 vom Master in einem Takt von 60 Sekunden abgefragt und in die Datei 0872230.csv geschrieben.

Abbildung 30: Beispiel der Konfigurationsdatei

Die resultierende .csv-Datei (Abbildung 31) enthält in der ersten Spalte einen Zeitcode: Sekunden ab Start der Masterplatine (Anklemmen der Batterie). Bei Unterbrechung der Stromversorgung (etwa Wechsel der Batterie für eine Langzeitmessung) beginnt dieser Zähler wieder bei 0. Die Genauigkeit der Messabstände (bspw. 60 Sekunden) ist durchaus etwas variabel (+/- zwei Sekunden). Die folgenden Spalten sind jeweils in Fünfergruppen pro Slave zu verstehen: Es folgen die Sensoren A, B, C, ein Messwert für den hier nicht verwendeten Sensoranschluss D und ein Nullkorrekturwert.



Microsoft Excel - 08072230.CSV

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Zeit_Sekunden	S_drei_A	S_drei_B	S_drei_C	S_drei_D	S_drei_N	S_zwei_A	S_zwei_B	S_zwei_C	S_zwei_D	S_zwei_N
2	86	1301	724	1768	42547	524269	173841	173841	173841	350447	173841
3	146	1295	790	1833	63030	524267	173841	173841	173841	350447	173841
4	206	1299	787	1830	64081	524271	350447	173841	173841	350447	173841
5	267	1300	799	1833	63636	524270	350447	350447	350447	350447	173841
6	327	1300	789	1828	62927	524268	350447	350447	350447	350447	173841
7	387	1297	790	1827	63053	524270	350447	350447	350447	350447	173841
8	447	1301	804	1837	62908	524271	350447	350447	350447	350447	173841
9	507	1300	789	1831	63033	524269	350447	350447	350447	350447	173841
10	567	1300	788	1832	63481	524267	350447	350447	350447	350447	173841
11	627	1298	783	1833	62729	524268	350447	350447	350447	350447	173841
12	688	1296	783	1828	62566	524265	350447	350447	350447	350447	173841
13	748	1295	783	1831	62732	524267	350447	350447	350447	350447	173841
14	808	1299	785	1831	76880	524270	350447	350447	350447	350447	173841
15	868	1298	789	1837	61781	524269	350447	350447	350447	350447	173841
16	928	1294	777	1834	63246	524268	350447	350447	350447	350447	173841
17	988	1301	788	1832	62460	524269	350447	350447	350447	350447	173841
18	1049	1302	790	1834	61839	524272	350447	350447	350447	350447	173841

Abbildung 31: Beispiel einer gemessenen .CSV-Datei

CompactFlash-Medien müssen im System FAT formatiert sein (bei Karten bis 512 MB sollte das üblicherweise der Liefer- und Standardzustand sein).

Blinkcodes der Status-LED für mögliche Fehler des Masters:

Dreimal blinken – Pause der Status-LED heißt, dass alles in Ordnung ist, fünfmal blinken und Pause signalisiert ein Problem (mit dem CompactFlash-Modul).

Checksummen-Fehler und nicht erreichbare Slaves werden nicht durch Blinkcodes signalisiert, sondern sind nur am Debug-Anschluss zu erkennen.

Zu sehende Daten-Zeilen am Debug-Anschluss sehen folgendermaßen aus:

sgDA 0 0 0 0 0 0 0

Es stehen „s“ für Slave“, „g“ für Slave-Nummer 7 (g ist der siebte Buchstabe des Alphabets), „0 0 0 0 0 0“ bedeutet, es wurden Nullen in die .CSV-Datei geschrieben, weil entweder die Checksumme ungültig war oder keine Daten empfangen werden konnten.

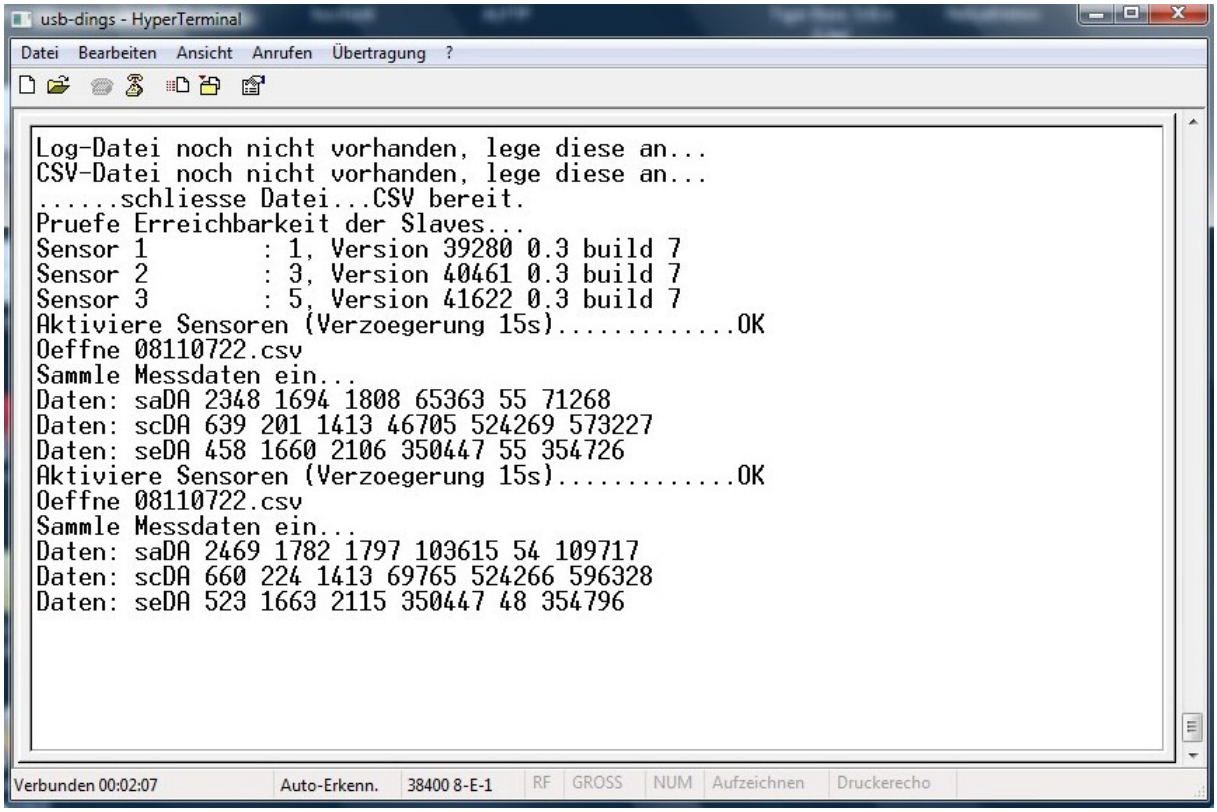


Abbildung 32: Ausgabe des Debuganschlusses im Terminal

3 Praktischer Einsatz des Messgeräts

3.1 Feldtauglichkeit

Im Rahmen des BAtroS Projekts wurde das Messgerät das erste Mal im Feldversuch eingesetzt (Abbildung 33 und Abbildung 34).

Die Sensoren wurden auf den Versuchsparzellen mit Hilfe von Stativklemmen an Metallstangen befestigt. Als Schnittstelle zwischen Blatt und Sensor diente hier eine Wäscheklammer der Marke „Peggy Perfect“. Diese wurde an den Andruckstellen mit einem Fensterdichtband von der Marke „Tesa Moll Typ E“ beklebt. Dieses Dichtband besteht aus aufgeschäumtem Gummi und bietet so einen deutlich besseren Grip, damit die Klammer nicht vom Blatt abrutscht. Gleichzeitig werden Beschädigungen am Blatt durch die Pufferwirkung des aufgeschäumten Gummis vermindert.

Im Feldeinsatz konnte die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Geräts nachgewiesen werden. Die Datenkommunikation und deren Aufzeichnung funktionierten grundsätzlich.

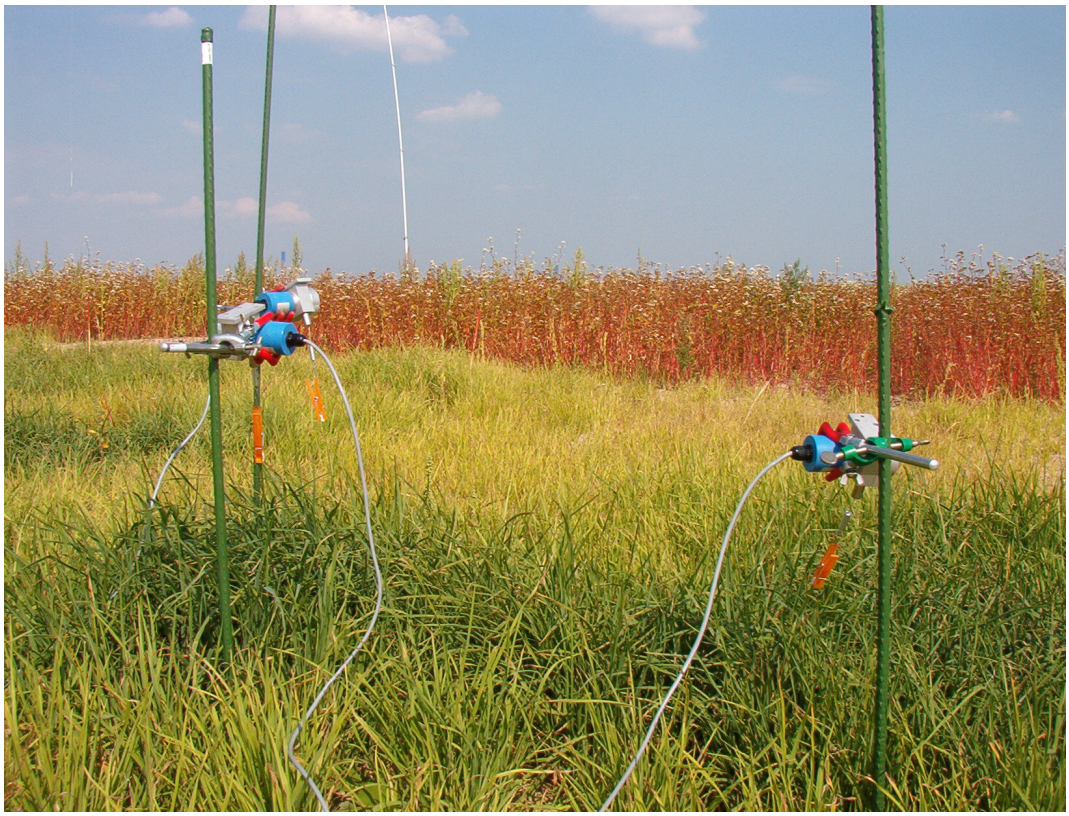


Abbildung 33: Versuchsaufbau in einer Knaulgrasparzelle

Abbildung 34: Versuchsaufbau in einer Sonnenblumenparzelle

Abbildung 35 zeigt einen Sensor im Feldeinsatz im Detail. Obwohl hier schon die Zugkraft des Sensors vermindert wurde, war es problematisch, die komplette Sensorlänge von 15 cm nutzen zu wollen. Der Effekt, dass die Zugstärke mit stärker gespannter Feder im Sensor zunimmt, musste neu bedacht werden.

Bei der Messung im Feld sind verschiedene Probleme offensichtlich geworden. Der Einsatz auf dem Feld stellt das Gerät vor deutlich andere Ansprüche als im Gewächshaus. Regelmäßig waren die Sensoren vom Blatt abgerutscht oder abgerissen. Dies hing vermutlich mit stark böigen Wind zusammen.

Messungen an Kulturen mit langen Stängeln und weichem Blattgewebe wie Sonnenblumen waren unter den Bedingungen so nicht möglich (Abbildung 34).

Abbildung 35: Detailaufnahme von Sensor im Einsatz im Feld

Das primäre Problem ist also eine optimale Anpassung der Faktoren Sensorzug und Klammer an die Faktoren Blatt und Umweltbedingungen zu erreichen.

Von der Konstruktionsseite aus lassen sich nur Sensorzug und Klammer anpassen. Dies wurde im Folgenden im Zuge von Optimierungsmaßnahmen im Labor durchgeführt.

Bedauerlicherweise sind die erhobenen Daten aus diesen Einsätzen auf dem Feldversuch bei einem Autounfall verloren gegangen und können deshalb hier nicht im Detail dargestellt werden.

3.2 Optimierungsmaßnahmen

Nach den Erkenntnissen, die bei der Feldarbeit gewonnen wurden, wurde das Messgerät noch einmal im Labor geprüft. Das Augenmerk lag dabei nicht auf dem eigentlichen Gerät, sondern auf der Mechanik der Sensoren und der Schnittstelle zwischen Sensor und Pflanze, dem verwendeten Klammertyp.

3.2.1 Klammereigenschaften

Die Ansprüche an die Klammer, die als Schnittstelle zwischen Blatt und Messsensor fungiert sind vielfältig:

- Sie soll am Blatt halten.
- Sie soll das Blatt nicht beschädigen.
- Sie soll möglichst wenig Blattfläche beschatten.
- Sie soll möglichst gleich gefertigt sein, dass alle Blätter ähnlich gestresst werden.
- Sie sollte nach Möglichkeit einfach im Gebrauch sein.

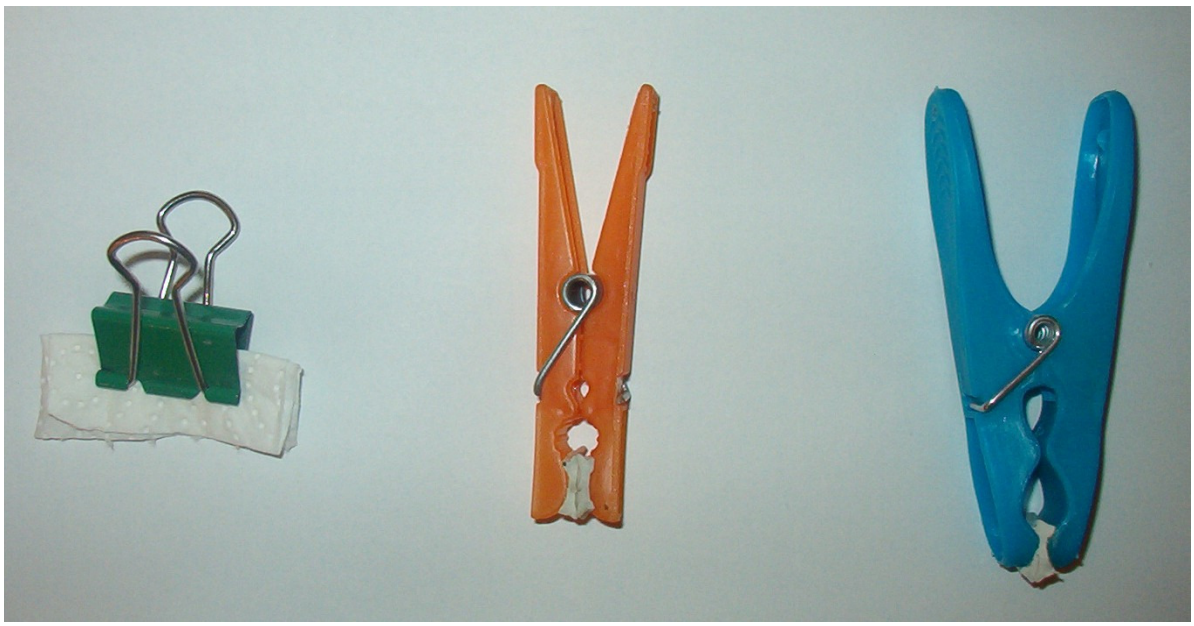


Abbildung 36: Getestete Klammertypen. Von links nach rechts: Foldback-Klammer mit Zellstofftuch als Puffer; Wäscheklammer Typ „Peggy Perfect“ mit Tesa Moll Typ E als Puffer; Wäscheklammer Typ „dm“ mit Tesa Moll Typ E als Puffer

Erste Versuche wurden mit einer Foldback-Klammer durchgeführt. Um das Blatt vor Verletzungen zu schützen, wurde ein Stück Zellstofftuch als Puffer zwischen die Andruckstellen gelegt.

Probleme die bei Benutzung der Foldback-Klammer auftraten:

- Andruckstelle zu klein
- Anpressdruck zu hoch
- Zu wenig Grip und ungleichmäßige Gripverteilung
- Starke Erwärmung des Metalls
- Beschattung der Blattspitzen durch den Puffer

In zweiter Instanz wurden Versuche mit Wäschekammern des Typs „Peggy Perfect“ durchgeführt. Diese stellten in Verbindung mit dem Fensterabdichtklebeband „Tesa Moll Typ E“ eine deutliche Verbesserung zu der Foldback-Klammerlösung dar.

Die Andruckstelle ist deutlich größer, durch das Fensterabdichtklebeband ist der Grip hervorragend, die Eigenschaft als Druckpuffer ist deutlich besser, die Kunststoffklammer wird wesentlich weniger warm und die Beschattung der Blattspitzen ist deutlich geringer. Jedoch zeigte sich der Anpressdruck in der Praxis als zu klein. Die Blätter rutschten häufig aus den Klammern. Außerdem lässt die Verarbeitungsqualität der Klammern das Typs „Peggy Perfect“ zu wünschen übrig. Die Spannung der Federn ist ungleichmäßig und die Bewegungsführung beim Öffnen und Schließen der Klammer labil. Dies kann zum Zerfallen der Klammer in ihre Einzelteile führen.

Neuester Stand der Entwicklung des Blatt/Messgerät-Interfaces stellt eine Wäscheklammer der Firma dm dar. Diese Klammer vereinigt die Vorteile des Klammertyps „Peggy Perfect“ gegenüber der Foldback-Klammer, ist aber gleichzeitig deutlich besser verarbeitet, bietet einen höheren Anpressdruck und die Anpressstellen sind günstiger geformt, da sie nicht geschwungen sind.

Abbildung 37 zeigt die Detailansicht eines Maisblatts, an dessen Blattspitze des zweitjüngsten Blatts über mehrere Tage ein Sensor hing. Ein Mal der Andruckstelle ist zwar deutlich zu sehen, da die Struktur der Andruckstelle wellig wurde und der vom Licht abgedeckte Teil heller. Jedoch ist auch zu erkennen, dass die Blattspitze an sich unversehrt ist und die gleiche Grünintensität wie das Restblatt aufweist.

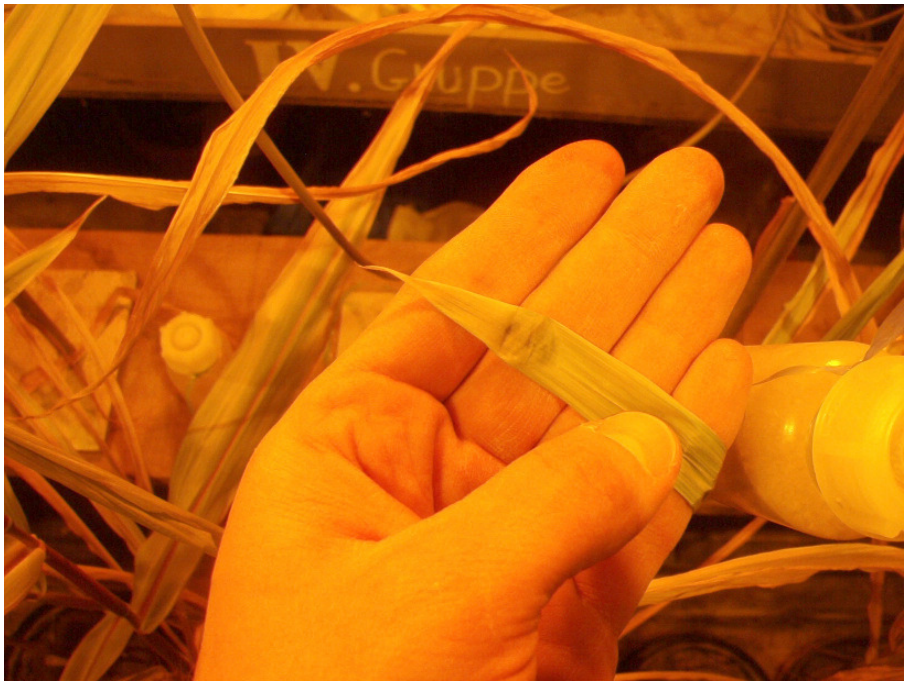


Abbildung 37: Andruckstelle am Blatt nach mehrtägiger Messung

3.2.2 Federzugkorrektur

Aus den Erfahrungen des Feldversuchs resultierte die Idee die Federkraft der Sensoren im Detail zu untersuchen und die Sensoren auf eine möglichst Identische Zugkraft zu bringen.

Eine große Herausforderung ist dabei die Anfangslast, also die Kraft, die man braucht, um das Seil aus dem Sensor das erste Stück zu ziehen, bei allen Sensoren aneinander anzugleichen. Gleichzeitig muss Sorge getragen werden, dass es sich mit der Endlast möglichst identisch verhält. Dabei muss aber natürlich der Sensor gangbar bleiben.

Der verbaute Federtyp ist eine Spiralfeder mit Drehmomentbelastung (Abbildung 38 und Abbildung 39). Spiralfedern werden als in einer Ebene spiralförmig aufgewickeltes Metallband gefertigt. Sie werden beispielsweise oft als mechanischer Energiespeicher genutzt. Vor allem in mechanischen Uhren waren sie lange Zeit als Antrieb wegen des recht großen, recht linearen Bereichs auf ihrer Federkennlinie (Abbildung 40) unverzichtbar.

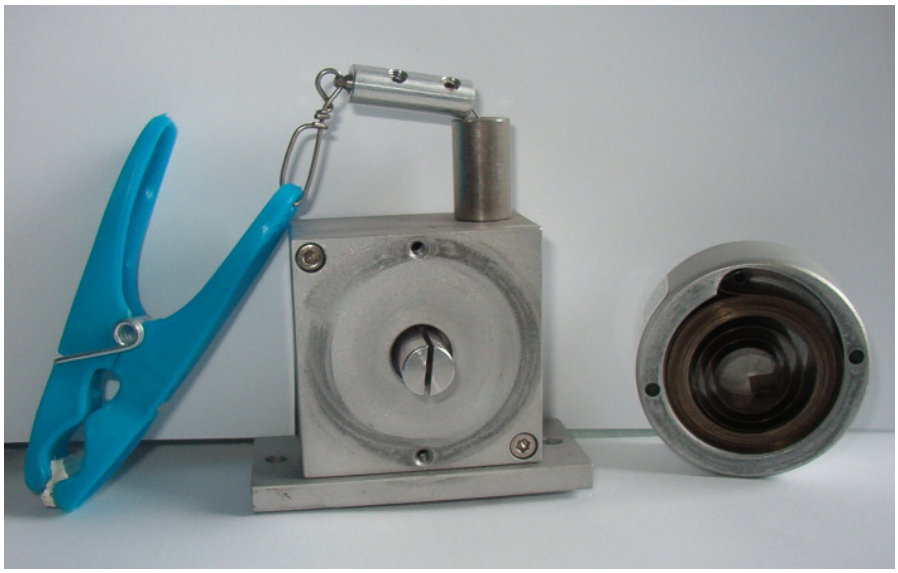


Abbildung 38: Sensor mit abgeschraubtem Federgehäuse

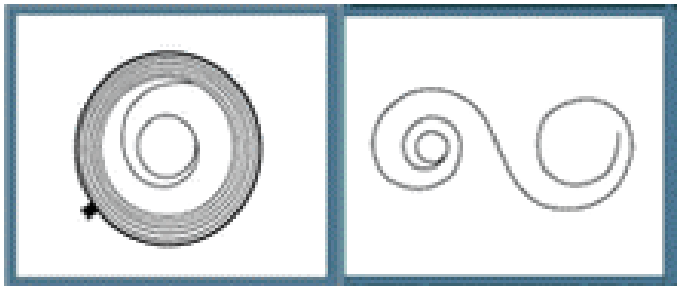


Abbildung 39: Im Sensor verbauter Federtyp: Spiralfeder

Abbildung 40 zeigt die Federkennlinie einer Spiralfeder. Aus dieser geht hervor, dass Spiralfedern über einen Bereich aufweisen, in dem die Anzahl der Umdrehungen kaum Auswirkungen auf das Drehmoment hat und somit die Kraft, die von der Feder ausgeht, annähernd konstant ist.

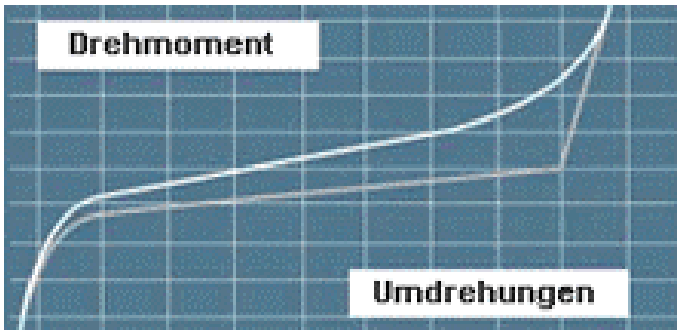


Abbildung 40: Federkennlinie einer Spiralfeder

In der Praxis heißt das, dass der Zug der Feder, abhängig vom Startpunkt der Federkennlinie, unterschiedlich stark pro weiterer Umdrehung ansteigen kann. Idealerweise wird die Feder bis zum Beginn des annähernd linearen Plateaus der Federkennlinie gespannt. Durch das Ausziehen des Seils aus dem Sensor wird die Feder weitere zwei Umdrehungen gespannt. Theoretisch sollten also alle Sensoren in sehr ähnliche Grundzustände zu bringen sein. Zu diesem Zweck und zur Überprüfung der Anfangs- und Endlast wurde eine Teststation entwickelt, die es ermöglichen sollte, diese Werte möglichst wahrheitsgetreu zu ermitteln.

Am Kopf eines Ständerwerks mit Hebe- und Senkvorrichtung, die an einer vertikalen Achse an selbigem verläuft, wurde eine Stativklemme befestigt und mit Hilfe dieser wiederum der zu testende Sensor. Unterhalb der Stativklemme wurde eine Waage positioniert. Durch kontrollierte Auf- und Abbewegungen des Bedienhebels der Hebe/Senkvorrichtung konnte die Position der Sensorhöhe geändert werden (Abbildung 41). Um eine Startlast ermitteln zu können, wurde die Sensorfeder so weit gespannt, bis sie durch ihren Zug das Seil ausreichend gespannt hielt, sodass es im Sensorgehäuse nicht von seiner Spindel fiel. Nun wurde ein definiertes Gewicht an den Sensor und damit auf die Waage gebracht. Selbiger wurde herunter gefahren, bis das Seil des Sensors im Gehäuse so weit verschunden war, dass die Ausgangsposition erreicht wurde. Nun wurde der Sensor so weit herausgefahren, dass das Seil das erste kleine Stück aus dem Gehäuse herausschaute. Dies wurde mehrfach wiederholt und der gemittelte Wert der auf der Waage abgelesenen Differenzen notiert. Als nächster Schritt wurde das gleiche Prozedere am anderen Ende des ausgezogenen Sensorseils durchgeführt, und so die Endlast als Differenz zwischen abgelesenem Wert auf der Waage und definiertem Gewicht festgestellt und notiert. Zu der Gelegenheit wurde der letzte Zentimeter des Seils vor Komplettauszug farbig markiert, um eine Beschädigung des Sensors durch mechanische Überbelastung zu verhindern (Abbildung 42).

Abbildung 41: Bedienung der Teststation

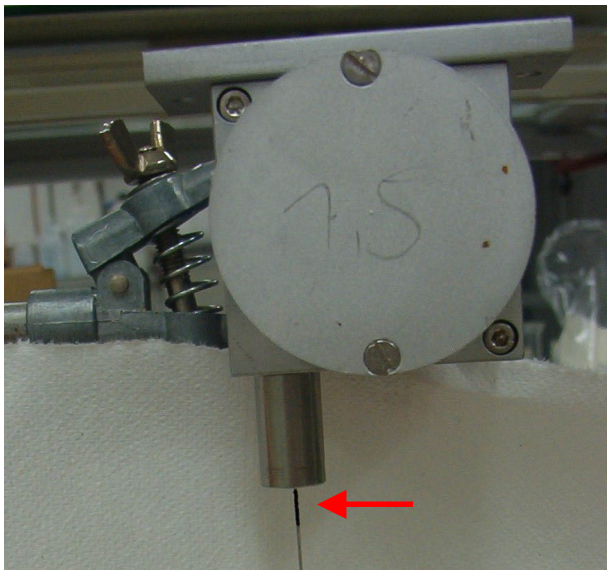


Abbildung 42: Farbliche Markierung des Endbereichs des Sensorseils

Aus den erhobenen Messwerten und der entsprechenden Auswertung ging hervor, dass die Sensoren sich nicht so identisch verhalten wie erwartet. Exemplarisch ist in Abbildung 43 die ermittelte Federkennlinie für Sensor 2C dargestellt. Die Messungen ergaben, dass man die Federn mindestens dreifach spannen muss, damit das Sensorseil unter ausreichender Spannung steht. In den meisten Fällen bewegten sich die Delta-Werte dann auch innerhalb des quasilinearen Bereichs. In einigen wenigen Fällen musste aber auch vierfach oder fünffach gespannt werden, um ein Delta zwischen 100 g und 150 g zu erreichen.

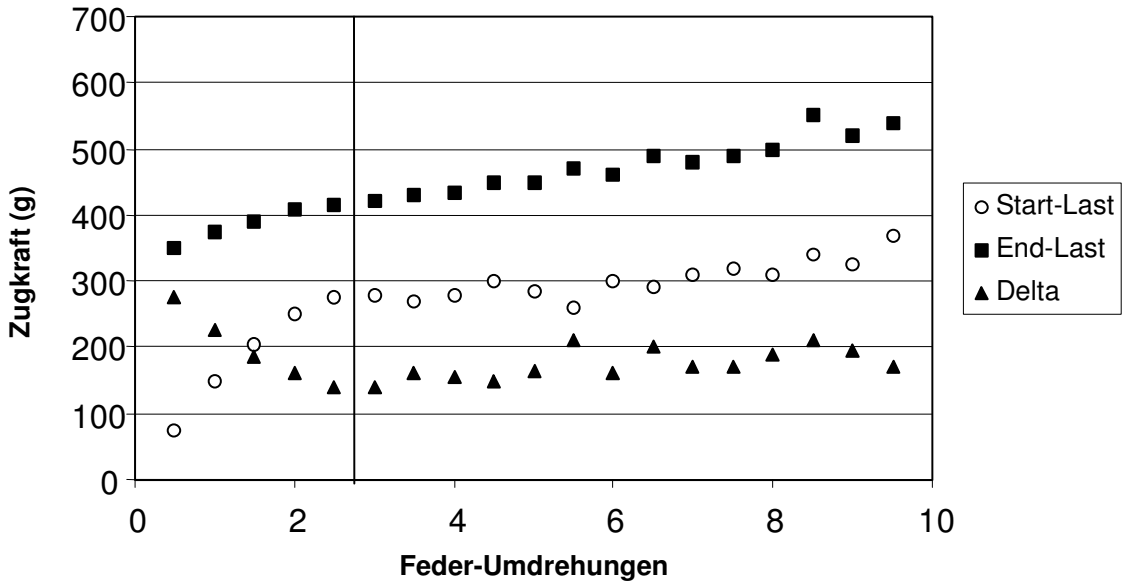


Abbildung 43: Ermittelte Federkennlinie für Sensor 2C

Alle Sensoren wurden auf eine Startlast zwischen 300 g und 400 g sowie auf ein Linearitätslevel, welches ein Delta von 100 g bis 150 g einhält gebracht. Eine genauere Kalibrierung war nicht möglich.

Da eine Zuglast von 300 g bis 400 g für ein Pflanzenblatt viel erschien, wurde ein Gewicht an der Klammer von 100 g installiert. Dies hat den Effekt, dass die Spiralfeder durch ihre Umdrehungen im linearen Bereich der Federkennlinie liegt, aber mit weniger Zug an dem Blatt zieht.

3.2.3 Störende Effekte bei der Datenauswertung

Wie auf Abbildung 31 im Kapitel 2.3.4 gezeigt, entstehen als Produkt der Messreihen recht umfangreiche .csv Dateien. Bei der Aufbereitung der Daten sind einige Effekte zu Tage getreten, die nachfolgend erklärt werden.

Nullwertreihen

Die .csv-Dateien können Nullwertreihen enthalten, die den Graphen bei einer Visualisierung bisweilen unerwünscht verlaufen lassen (Abbildung 44). Diese Nullwerte können bei der Datenauswertung mit Excel ausgefiltert werden. Dabei werden die Nullwerte durch den Mittelwert des vorhergehenden und nachfolgenden Messwertes ersetzt.

Es kommt zu diesem Effekt, wenn ein Fehler in der Datenkommunikation auftritt. Eine mögliche Ursache ist der Empfang von Daten, die als fehlerhaft erkannt worden sind. Dies ist möglich, da neben den reinen Messwertinformationen eine Prüfsumme von den Slaves gebildet wird und im Master nach der Übertagung eine Probe gemacht wird. Stimmen die Prüfsummen nicht überein, werden die Messwerte verworfen. Eine andere mögliche Ursache für Nullwertreihen sind nicht erreichbare Slaveplatinen. Diese werden vor jedem Messvorgang gebootet. Unter bestimmten Umständen kann sich der Bootvorgang verzögern oder sogar abbrechen. Ist das der Fall, werden die erwarteten Messwertreihen mit Nullen ausgefüllt.

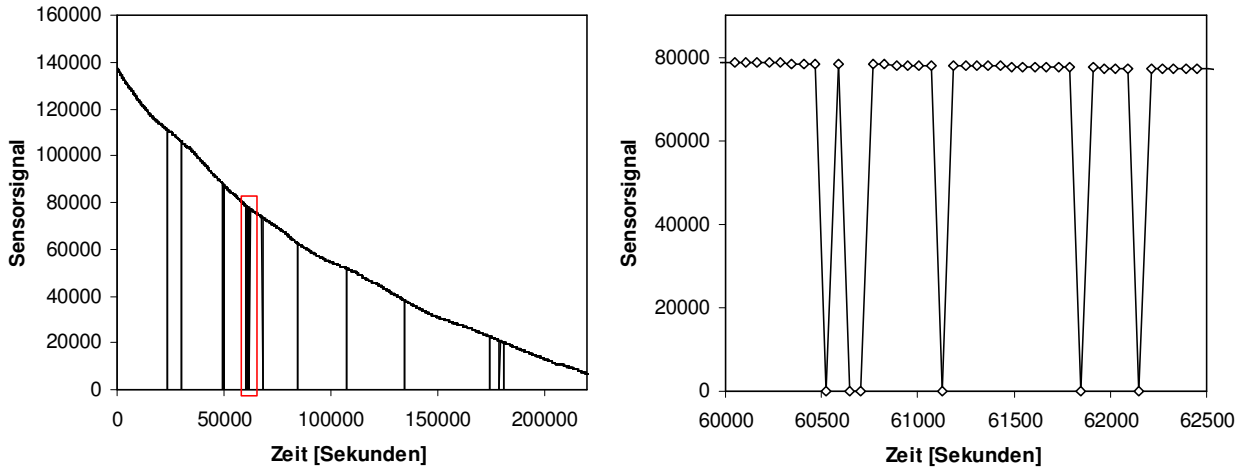
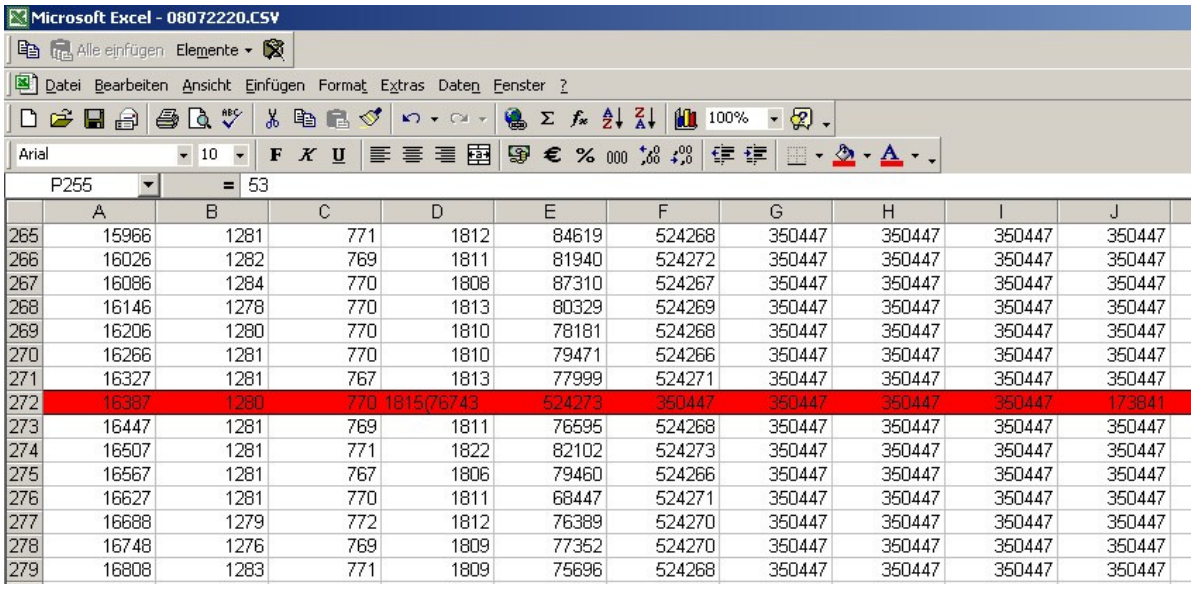


Abbildung 44: Daten-Übertragungsfehler (mit Detailvergrößerung rechts)

Strukturelle Datenfehler

In den .csv-Dateien können Fehler auftreten, die auf einen Schreibfehler der Datei deuten. Diese Vermutung liegt nahe, betrachtet man die markierte Auffälligkeit in Abbildung 45. In Zelle D272 sind zwei Werte verschmolzen. Dies kann nur dann passieren, wenn in der .csv-Datei die Werte fälschlicherweise nicht durch ein Komma voneinander getrennt werden. Hier ist offenbar das Komma nicht geschrieben worden, sondern eine geöffnete Klammer. Der negative Effekt dabei ist, dass alle nachfolgenden Spalten von diesem Fehler betroffen sind. Diese Fehler müssen manuell korrigiert werden.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
265	15966	1281	771	1812	84619	524268	350447	350447	350447	350447
266	16026	1282	769	1811	81940	524272	350447	350447	350447	350447
267	16086	1284	770	1808	87310	524267	350447	350447	350447	350447
268	16146	1278	770	1813	80329	524269	350447	350447	350447	350447
269	16206	1280	770	1810	78181	524268	350447	350447	350447	350447
270	16266	1281	770	1810	79471	524266	350447	350447	350447	350447
271	16327	1281	767	1813	77999	524271	350447	350447	350447	350447
272	16387	1280	770	1815(76743	524273	350447	350447	350447	350447	173841
273	16447	1281	769	1811	76595	524268	350447	350447	350447	350447
274	16507	1281	771	1822	82102	524273	350447	350447	350447	350447
275	16567	1281	767	1806	79460	524266	350447	350447	350447	350447
276	16627	1281	770	1811	68447	524271	350447	350447	350447	350447
277	16688	1279	772	1812	76389	524270	350447	350447	350447	350447
278	16748	1276	769	1809	77352	524270	350447	350447	350447	350447
279	16808	1283	771	1809	75696	524268	350447	350447	350447	350447

Abbildung 45: Schreibfehler in .csv-Datei

Stufige Graphen des Wachstumsverlaufs

Die Sensoren ziehen das Seil zum Teil nicht gleichmäßig, sondern ruckartig ein (Abbildung 46). Es muss stets eine gewisse Zugkraft anliegen um die innere Haftreibung zu überwinden. Die Sensoren sind zwar in der Lage, sehr kleine Längenänderungen (< 1 µm) zu erfassen, die Mechanik der Seileinzugsfeder verschlechtert diese Sensitivität bisweilen erheblich. Bei einer stärkeren Zugspannung trat dieses Problem nicht auf. Hier kam es jedoch häufiger zu Blattabrissen an der Halteklammer, oder die Klammer rutschte vom Blatt.

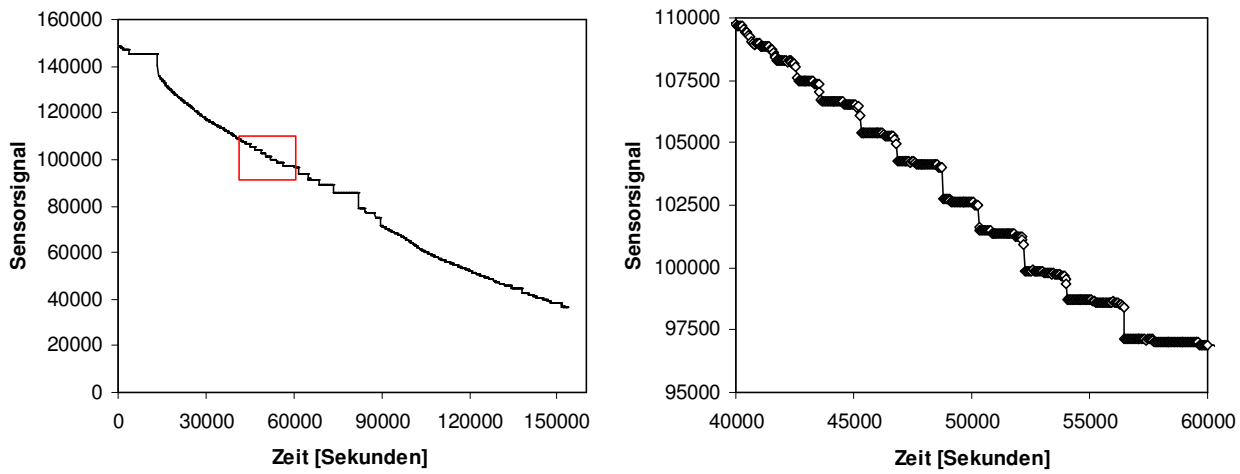


Abbildung 46: Ruckartiges Einziehen des Seilszugs bei der Blattlängenmessung (mit Detailvergrößerung rechts)

Laut Hersteller ist es problemlos möglich, die Federkraft der Feder am Sensor zu senken, ohne größere Probleme in Funktion oder Messqualität des Sensors zu provozieren. Die genauere Untersuchung der Sensoren am Gehäuseteil, an dem das Federgehäuse ansitzt, zeigte jedoch Schleifspuren der Feder am Gehäuse des Sensors (Abbildung 47). Vermutlich kann hier die Feder nicht frei entspannen, so dass es zu den in Abbildung 46 gezeigten Effekten kommt.

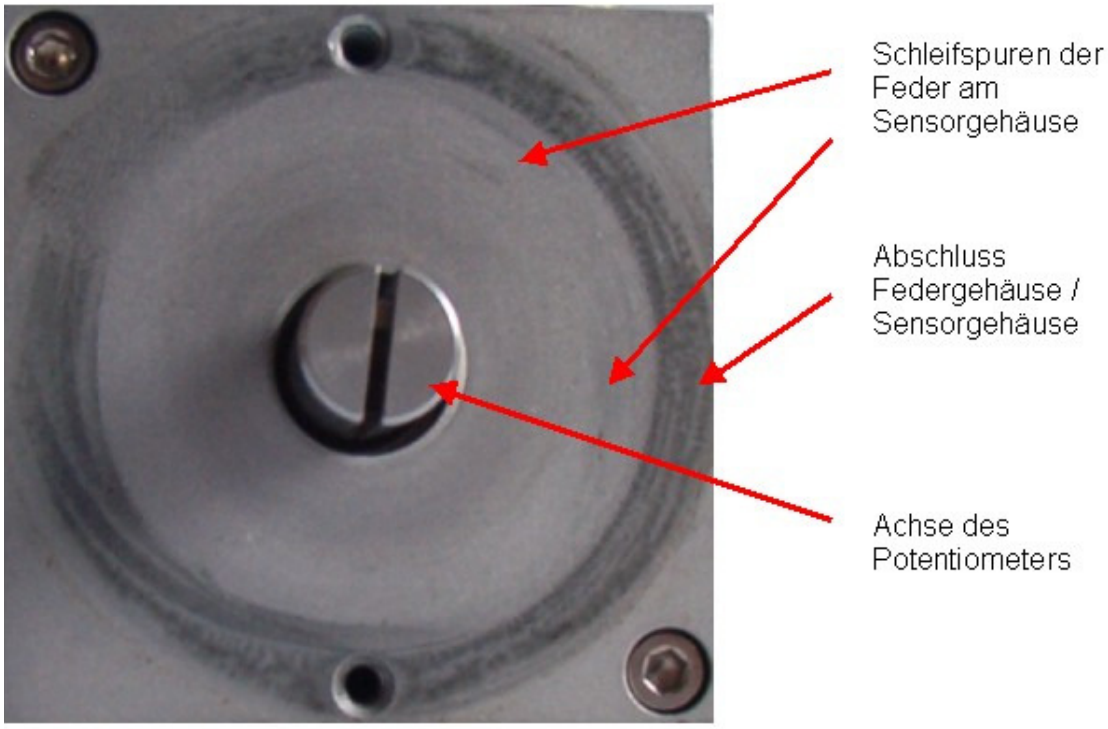


Abbildung 47: Detailaufnahme der Oberfläche des Sensorgehäuses unter dem Federgehäuse

3.3 Abschließende Untersuchung im Gewächshaus

3.3.1 Versuchsbeschreibung

Nach Optimierung der Sensoren und der Blattbefestigung folgte eine Validierung der Weiterentwicklung im Gewächshausversuch. Dabei sollte überprüft werden, ob Unterschiede im Blattlängenwachstum von monokotylen Pflanzen unter unterschiedlicher Wasserversorgung messbar sind.

Die Versuchspflanzen (Mais) wurden am 03.10.2008 in Töpfen mit jeweils 3500 g Meckenheimer Krume angezogen (Abbildung 48). In acht Versuchtöpfe wurden je zwei Maiskörner gelegt. Die Töpfe werden von A1 bis A4 und von B1 bis B4 beschriftet. Diese wurden aufgedüngt und bei 80 % der Wasserhaltekapazität feucht gehalten.

Abbildung 48: Versuchstopf mit Meckenheimer Krume

Am 18.11.2008 war ein Entwicklungsstadium der Pflanzen erreicht, welches ausreichend stabile Blätter hervorbrachte und so eine nichtdestruktive Messung erlaubte. Es wurden zwei mal vier Maispflanzen an das Messgerät gebracht. Die Sensoren wurden dabei regelmäßig an das zweitjüngste Blatt gehangen.

Das Wachstum aller Versuchspflanzen wurde zunächst bei einer Bodenfeuchte von 80 % der Wasserhaltekapazität (WHK) gemessen, um vergleichende Wachstumswerte für die verschiedenen Pflanzen im Grundzustand zu haben. Ab dem 30.11.2008 wurden die Töpfe der Variante A bei 80 % WHK Bodenfeuchte gehalten, bei den Töpfen der Variante B wurde die Bewässerung eingestellt, bis eine Bodenfeuchte von 20 % WHK erreicht war. Durch regelmäßiges Wiegen aller Varianten wurde die aktuelle Bodenfeuchte ermittelt und entsprechend des geplanten Zielwertes aufgegossen.

Abbildung 49 zeigt den Versuchsaufbau im Gewächshaus gegen Ende des Versuchs.

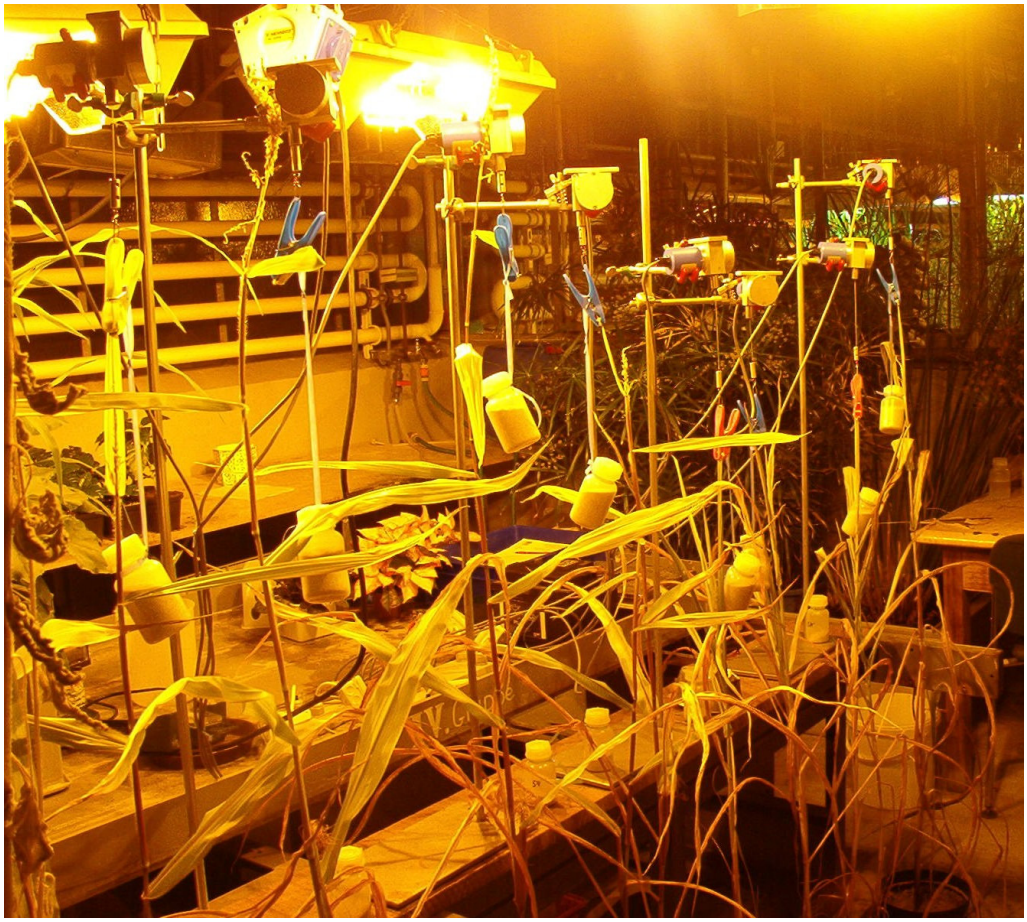


Abbildung 49: Versuchsaufbau im Gewächshaus gegen Ende des Versuchs

Klimadaten im Gewächshaus wurden mit Hilfe eines Tinytags erfasst.

Während der Messungen wurde die Temperatur im Gewächshaus in einem Bereich zwischen etwa 19 und 27°C gehalten (Abbildung 50), wobei die mittlere Temperatur im Dezember etwa 1°C niedriger lag als im November. Die relative Luftfeuchte (rel. LF) schwankte im gesamten Messzeitraum zwischen 50 und 75 % rel. LF. Bei der Luftfeuchte war der Tag-Nacht-Rhythmus nicht so stark ausgeprägt wie bei der Temperatur.

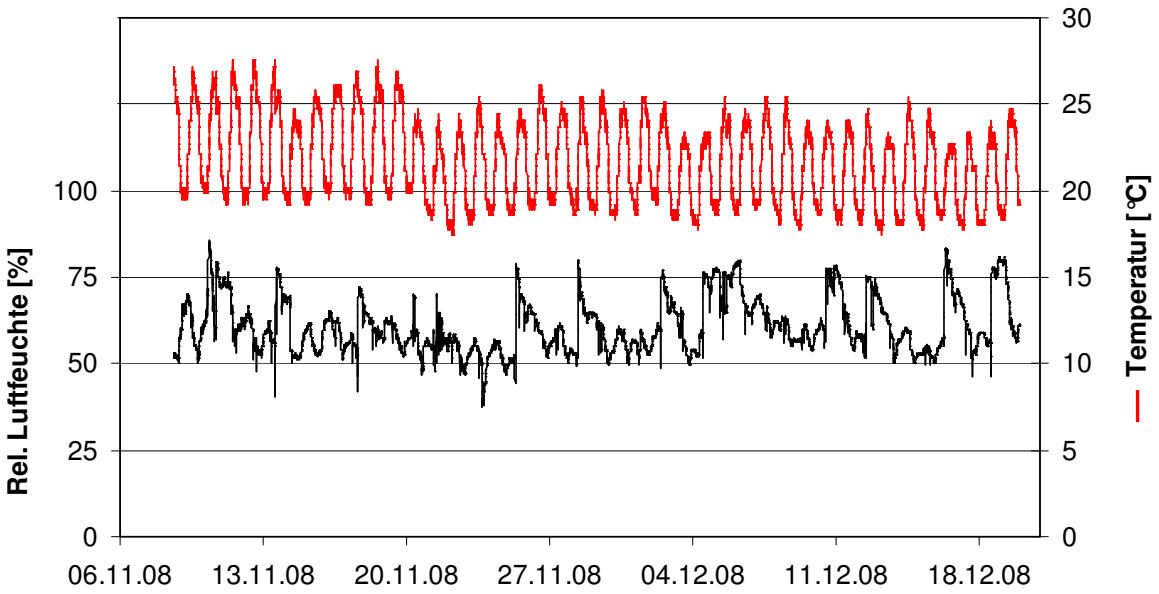


Abbildung 50: Verlauf der Temperatur und Luftfeuchte im beheizten Gewächshaus während der Blattlängenmessungen

3.3.2 Versuchsergebnisse

Der Verlauf der Blattlängenwachstumsraten (aufsummiert zu Stunden-Raten in mm/h) ist exemplarisch für jeweils eine Feucht- und eine Trocken-Variante in Abbildung 51 dargestellt.

Ein Vergleich der beiden Feuchte-Varianten zeigt, dass sich die Bodenfeuchte am Ende des Versuch bestenfalls tendenziell auf das Blattlängenwachstum auswirkt. In beiden Fällen nehmen die Raten im Laufe des Versuchs ab und liegen am Ende unter 1 mm/h.

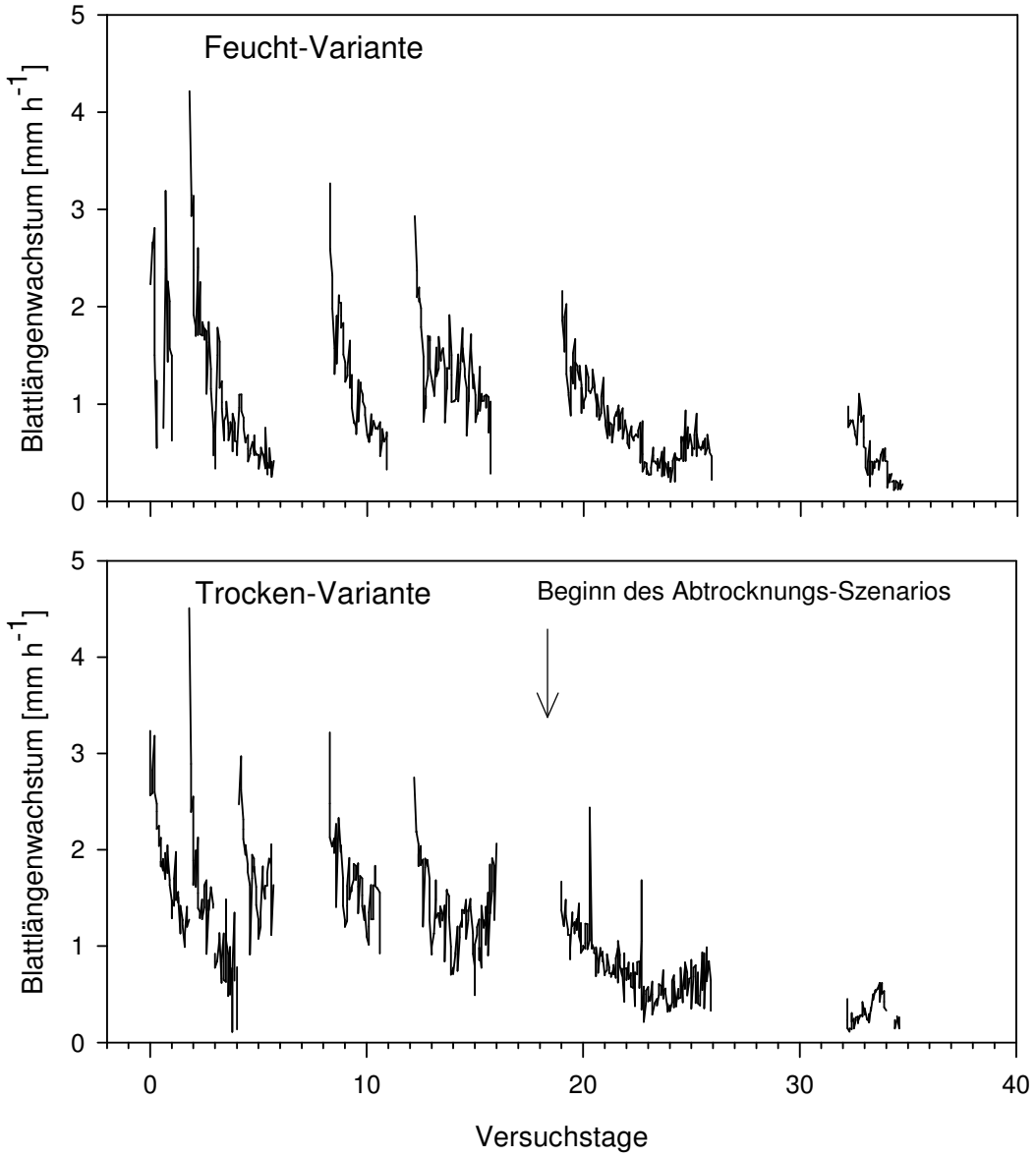


Abbildung 51: Blattlängenwachstumsraten (in mm/h) von Maispflanzen unter normal feuchten Bodenbedingungen und unter zunächst feuchten und dann abtrocknenden Bodenbedingungen; Der Beginn der Abtrocknungsphase ist in der Trocken-Variante markiert.

Im Mittel konnte bei den feuchtgehaltenen Pflanzen ein Blattwachstum von 182 mm gemessen werden, bei den Pflanzen mit dem abtrocknenden Boden betrug das Blattwachstum 168 mm (bei einer Standardabweichung von 33,8 bzw. 52,5 war dieser Unterschied nicht signifikant; n=4) Die Maispflanzen haben am Ende des Versuchs bereits die Rispen geschoben und somit das EC-Stadium 59 erreicht. Das Blattwachstum ist in diesem Stadium weitgehend abgeschlossen. Die Pflanzen der Trockenvariante sind am Ende des Versuchs nahezu vertrocknet, was auf Abbildung 49 zu erkennen ist. Eine detaillierte Betrachtung der Blattwachstumsraten zeigt, dass die Blätter nach jedem erneuten Anbringen des Sensors mit deutlich erhöhten Wachstumsraten reagierten (Abbildung 52). bei den jüngeren Blättern am Beginn des Versuchs machte sich dieser Effekt stärker bemerkbar als am Ende des Versuchs.

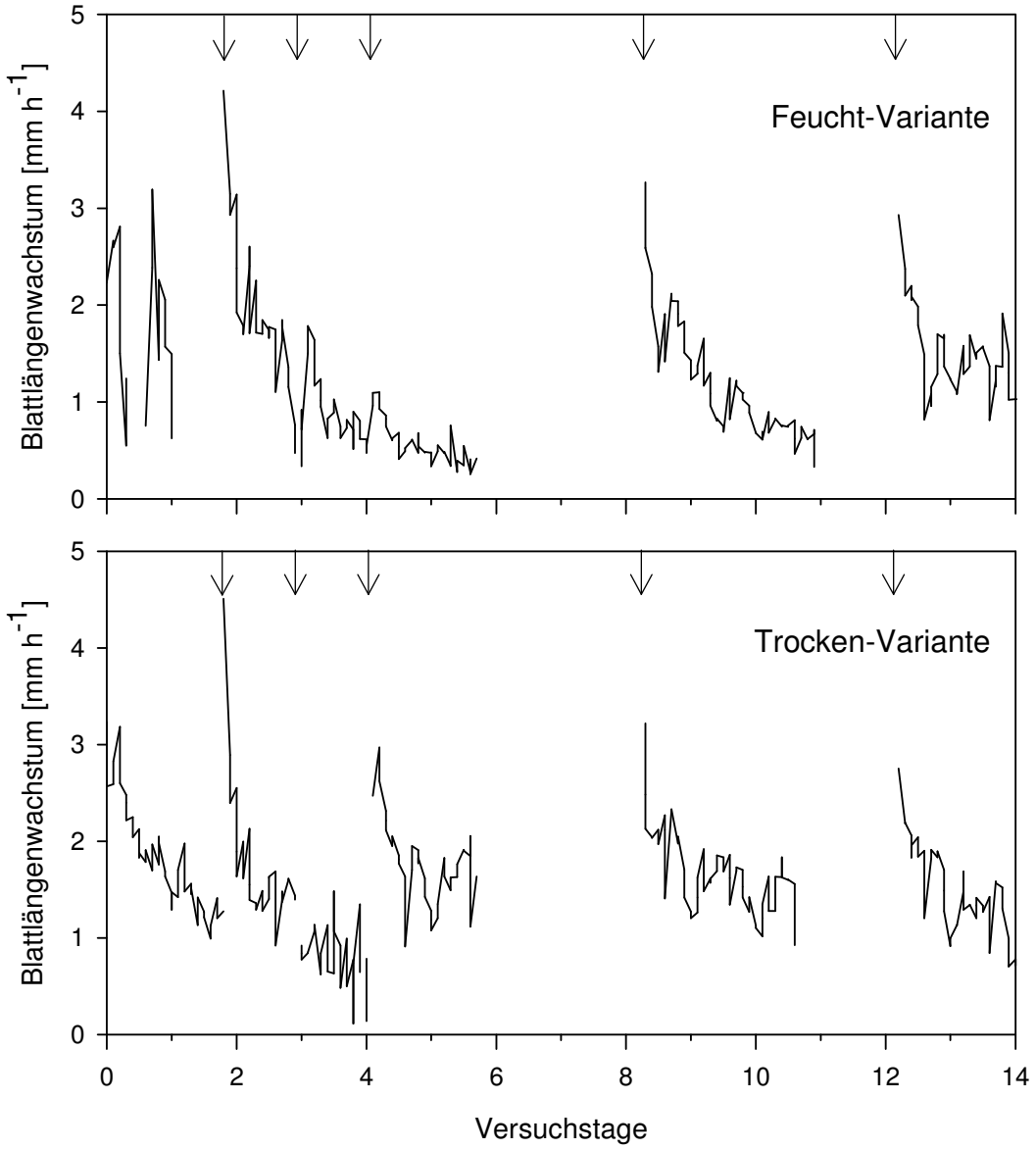


Abbildung 52: Blattlängenwachstumsraten (in mm/h) von Maispflanzen jeweils unter normal feuchten Bodenbedingungen. Die Pfeile markieren den Zeitpunkt des Anbringens des Blattlängenmess-Sensors an ein Blatt.

Es ist zu vermuten, dass dieser Effekt auf die Zugspannung der Sensoren zurückzuführen ist. Diese ziehen im ausgezogenen Zustand beim Anhängen des Blattes mit einer Kraft von etwa 3000 mN und mit fast eingezogenen Seil mit einer Kraft von etwa 2000 mN.

Es zeigt sich aber auch, dass dieser Effekt vor allem dann auftritt, wenn das Blatt einige Tage „entspannt“ gewachsen ist, da beispielsweise das einfache Umsetzten der Sensoren am Tag 3 bei weitem nicht die Blattwachstumsraten verursachte wie das Anhängen eines neuen Blattes an Tag 2 oder Tag 8.

Bei den Messungen ließen sich keine Tagesgänge im Blattwachstum erkennen (Abbildung 53).

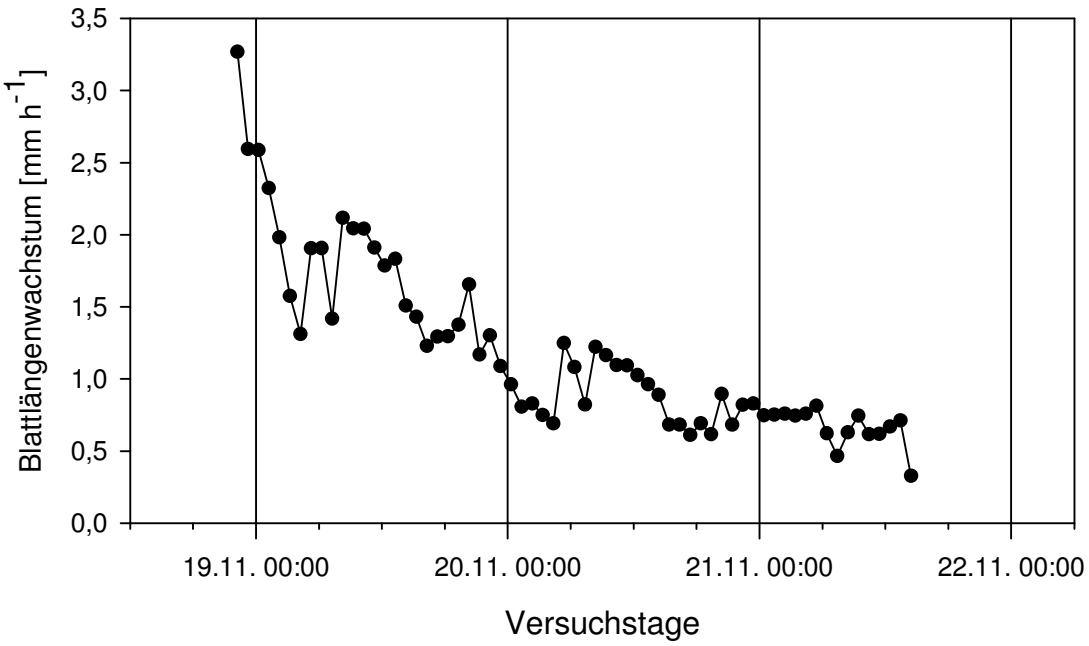


Abbildung 53: Wachstumsraten (in mm/h) eines Maisblattes über einen Messzeitraum von drei Tagen. (Die Punkte kennzeichnen die aufsummiert zu Stunden-Raten in mm/h, Feuchtvariante Tag 8 bis 11).

Die Zugspannung der Sensoren hat vermutlich auf das Blattlängenwachstum differenzierend wirkende Effekte überlagert. Andererseits kann bei einer Seillänge der Sensoren von 15 cm und bei Blattwachstumsraten von 2 mm/h maximal über einen Zeitraum von 3 Tagen gemessen werden. Es ist schwierig, in dieser Zeit einen Wachstumsrhythmus zu identifizieren.

3.3.3 Diskussion

In der Vorliegenden Arbeit wurde die Planung und Konstruktion eines Messgeräts zur automatisierten Blattlängenmessung beschrieben. Die Ergebnisse des abschließenden Versuchs an Mais zur Validierung der korrekten Funktionsweise des Geräts zeigen, dass Blattstreckungsbewegungen quantitativ mit hoher Genauigkeit erfasst werden können.

In Versuchen mit Rizinus hat **Walter (2001)** deutliche Tagesgänge des Blattwachstums nachweisen können. Diese hat er mit einer selbstentwickelten manuellen Methode, der so genannten „Faden-Methode“ gemessenen. Die Faden-Methode hat gegenüber automatisierten Methoden, wie zum Beispiel Messungen mit LVDTs (Linear Variable Differetial Transformers) den Vorteil, dass das zu untersuchende Blatt nicht fixiert werden muss. Damit wirken keine zusätzlichen externen Kräfte auf das Blatt. Das Blatt kann so die arttypischen nyctinastischen Bewegungen weiterhin durchführen. Diese Messmethode diente Walter so als Referenzmethode, um eventuell durch die Blattfixierung bedingte Artefakte anderer Methoden analysieren zu können. Bei gut wachsenden Blättern konnte mit dieser Technik von Hand alle zwei Stunden eine Messung der Mittelrippenlänge mit einer Auflösung von 0,1 mm durchgeführt werden. Aus einer Vielzahl von anderen Arbeiten geht hervor, dass das Blattlängenwachstum einen charakteristischen Tagesgang je nach Kultur aufweist **(Salah 1997, WALTER & SCHURR 2005)**. Diese Zusammenhänge konnten in der vorliegenden Arbeit nicht gefunden werden.

Ferner konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Blattwachstumsraten der Feucht- und der Trockenvarianten gemessen werden, obwohl aus der Literatur hervor geht, dass die Bodenfeuchte ein Schlüsselfaktor des Blattlängenwachstums ist. Bei Trockenheit ist das Blattlängenwachstum der Pflanzen deutlich verlangsamt. Das konnte **Tanguilig (1987)** bereits mit deutlich unpräziseren Messmethoden als dem hier entwickeltem Gerät nachweisen.

Diese fehlenden Zusammenhänge deuten darauf hin, dass das Messgerät selbst einen Einfluss auf das Blattlängenwachstum hat und zu Artefakten führt. Die im Versuch untersuchten Blätter sind mechanischen Belastungen ausgesetzt, die natürlicherweise nicht vorkommen. Pflanzen in dichten Pflanzenbeständen, wie zum Beispiel in einem Weizenbestand, sind zwar auch biomechanischen Belastungen ausgesetzt, wie etwa Winddruck und Berührung anderer Pflanzen aus dem Bestand, jedoch kommt es dabei nie zu einer Dehnung des Adergewebes, wie es bei dem getesteten Messprinzip der Fall ist. In Versuchen an Rizinus konnte **Walter (2001)** wachstumssteigernde Einflüsse von Zugkräften auf das Blattlängenwachstum

nachweisen. In diesen Versuchen wurde mit Zugkräften bis 300 mN gearbeitet. Im Validierungsversuch des Messgeräts wurde jedoch mit bis zu 3000 mN Zugkraft an Blättern gezogen. Es liegt nahe, dass der Effekt des starken Zugs am Blatt sämtliche andern Faktoren des Blattwachstums dominiert hat und so weder Tagesgänge noch Bodenfeuchteeinflüsse zu messen waren.

Blätter weisen eine gewisse Expansibilität auf. Jüngere Blätter dabei eine höhere im Vergleich mit älteren Blättern **(Walter 2001)**. Dies kann den im Validierungsversuch beobachteten Effekt erklären, dass die Blätter nach jedem erneuten Anbringen eines Sensors zunächst mit deutlich erhöhten Wachstumsraten reagierten und dann recht bald im Blattlängenwachstum nachließen (Abbildung 52). Bei jedem Neuanbringen eines Sensors an einem schon beprobten Blatt gab es einen sichtbaren Effekt, der mit jedem erneutem Neuanbringen eines Sensors geringer wurde. Möglicherweise spielte jedoch hierbei auch eine Rolle, dass die Sensoren zunächst mit voller Zugkraft am Blatt zogen, welche gegen Erreichen des Endes des Sensorseils deutlich geringer wurde. Die beschriebene höhere Expansibilität jüngerer Blätter im Gegensatz zu alten Blättern konnte im Validierungsversuch ebenfalls nachgewiesen werden.

Gallagher (1979) beschreibt Kritik an den Messtechniken, die üblicherweise zur Blattlängenmessung eingesetzt werden. So bemängelt er beispielsweise, dass die oft verwendeten LVDTs (Linear Variable Differetial Transformers) zu empfindlich auf Umwelteinflüsse reagieren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die verwendeten Seilzug-Wegaufnehmer-Sensoren diesbezüglich nicht getestet, weshalb entsprechende Effekte nicht auszuschließen sind.

Ferner bemängelt **Gallagher (1979)** die übliche Methodik, unabhängig der technischen Ausführung, von der Blattspitze zu einem fixen Punkt zu messen. Oftmals ist dieser Punkt der Boden. Leider wird bei den erhobenen Messungen regelmäßig vernachlässigt, dass nicht nur ein Blattwachstum gemessen wird, sondern auch zum Beispiel ein Internodienwachstum mitgemessen wird. Dies kann den Effekt in dem hier beschrieben Versuch erklären, dass ein Blattwachstum nach der Blüte des Mais zu messen ist.

Abschließend ist zu bemerken, dass die ermittelten Blattwachstumsraten möglicherweise nur wenig mit dem tatsächlichen, unbeeinflussten Blattwachstum zu tun haben. Es ist zu bezweifeln, dass das Messgerät im Versuchswesen in der Lage ist, Effekte unterschiedlicher Behandlungen nachzeichnen zu können.

4 Ausblick

Die Konstruktion eines Messgeräts zur parallelen Messung von Blattstreckungsraten, welches für den Einsatz unter Labor- und Freilandbedingungen gedacht ist, ist ein schwieriges, wenn nicht unmögliches Unterfangen. Im Rahmen einer agrarwissenschaftlichen Diplomarbeit war dieses Problem nicht abschließend zu bearbeiten. Die Versuche haben gezeigt, dass das Gerät im Prinzip funktioniert. Es ist ungewiss, in wie weit es in der Lage sein wird, Messungen unter verschiedenen Umweltdingungen an diversen Pflanzenarten vornehmen zu können. Für Freilandbedingungen müssen die Sensoren mit einem gewissen Zug am Blatt ziehen, da sonst Umweltfaktoren wie Wind die Wachstumsänderungen überdecken. Im Feld muss somit generell ein höherer Zug am Blatt anliegen, als in Gewächshaus oder Labor. Im Feldeinsatz könnte störenden Umweltfaktoren zum Beispiel mit dem Einsatz von Plexiglashüllen begegnet werden. Diese Maßnahme beeinflusst aber generell das Klima in der untersuchten Parzelle. Somit würden auch einige Faktoren, die das Blattwachstum beeinflussen (wie Temperatur und Luftfeuchte) verändert.

Für den Einsatz im Labor ist das Gerät ebenfalls nicht optimal geeignet. Hier wären deutlich geringere Zuglasten wünschenswert. Es besteht durchaus ein Verbesserungspotential. Die Elektronik ist quasi universell einsetzbar. Ein Tausch der Sensoren ist möglich. Eine andere Möglichkeit ist eine Überarbeitung der Sensoren. Denkbar wären zum Beispiel präzisere und sensiblere Federn oder der Einsatz von glätteren Oberflächen an entsprechenden Stellen am Sensor.

Eine mechanische Belastung des Blattes ist aber in keinen Fall auszuschließen, so dass die Messmethode an sich immer einen Einfluss auf das gemessene Blattwachstum ausüben wird. Um dies auszuschließen, wäre eine Abkehr von mechanischen hin zu berührungslosen Messmethoden, wie beispielsweise Bildverarbeitende Verfahren, notwendig.

Idealerweise würde das Blattlängenwachstum über dreidimensionale Bilderfassung aufgenommen und mittels geeigneter Wachstumsmodelingprogramme verarbeitet und so quantifiziert.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Messgerät zur Messung von Blattstreckungsraten von Kulturpflanzen entwickelt. Dieses sollte, sowohl zeitlich als auch räumlich hoch auflösend, automatisch messend und feldtauglich sein. Es sollte parallel und zeitgleich Messungen ermöglichen und für den Einsatz an monokotylen als auch an dikotylen Pflanzen geeignet sein. Bei den Entwicklungs- und Materialkosten durfte ein bestimmtes Budget nicht überschritten werden. Aus diesen Vorgaben ergaben sich gewisse Anforderungen an das Gerät, die entscheidenden Einfluss auf die Auswahl der Komponenten und die Konstruktion des Geräts hatten.

Die Entwicklung führte zu einem modular aufgebauten Messgerät, bestehend aus einer Mastereinheit, Slaveeinheiten und Sensoren. Die Mastereinheit übernimmt die Steuerung der Slaveeinheiten, die Energieversorgung des Systems Sowie Datenverwaltung und Speicherung. Die Slaveeinheiten erfüllen die Aufgabe, die von den Sensoren in analoger Form gemessenen Daten in maschinenverarbeitbare Form zu bringen (digitalisieren) und diese an die Mastereinheit zu schicken. Es können über einen Datenbus bis zu 15 Slaveeinheiten an die Mastereinheit angeschlossen werden. Die Slaveeinheiten können bis zu vier Sensoren handhaben. Das technische Design der Slaveeinheiten sieht vor, verschiedene Sensortypen anschließen zu können. Als Sensoren wurden Seilzug-Wegaufnehmer verwendet. Diese können das Blattwachstum mit einem 15 cm Messseil, welches über eine Spiralfeder eingezogen wird, messen. Die Funktion des Messgeräts wurde in Labor-, Gewächshaus- und Freilandversuchen getestet.

In den durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass das Messgerät technisch sowohl unter Labor- als auch unter Freilandbedingungen funktioniert. Im praktischen Einsatz im Gewächshausversuch konnten über einen Zeitraum von acht Wochen Blattlängenwachstumsraten von Maispflanzen unter verschiedenen Feuchtesituationen gemessen werden. Die erhobenen Messdaten zeigten bei der Auswertung deutliche Unterschiede zu dem an Hand der Literatur zu erwartenden Blattlängenwachstumsverhalten. So konnte kein signifikanter Einfluss der Bodenfeuchte auf das Blattlängenwachstum nachgewiesen werden. Ferner wurden keine Tagesgänge im Blattlängenwachstum gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass die Zugkraft des Sensors das Blattwachstum selbst beeinflusst und dass diese vermutlich der Grund ist, weshalb andere Faktoren wie Bodenfeuchte, Temperatur und Luftfeuchte weitgehend überlagert werden.

Ohne weitere Modifikationen ist dieses Messgerät für den praktischen Einsatz als nur bedingt geeignet anzusehen.

6 Literatur

Avery G.S. (1933): Structure and development of tobacco leaves. *American Journal of Botany* **20**, 565-592.

Banga M., BLOM C.W.P.M. & VOESENEK L.A.C.J. (1995): Flood-induced leaf elongation in Rumex species: effects of water depth and water movements. *New Phytologist* **131**, 191-198.

Boyer J.S. (1970): Leaf Enlargement and Metabolic Rates in Corn, Soybean and Sunflower at Various Leaf 'Water Potentials. *Plant Physiology* **46**, 233-235.

Gallagher J.N. (1979): Field Studies of Cereal Leaf Growth. *Journal of Experimental Botany* **30**, 645-655.

Kutschera U. (Ed.) (2002): Prinzipien der Pflanzenphysiologie. 2. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.

Salah H.B.H. & Tardieu F. (1997): Control of Leaf Expansion Rate of Droughted Maize Plants under Fluctuating Evaporative Demand. *Plant Physiology* **114**, 893-900.

Tanguilig V.C., Yamabo E.B., O'Toole J.C. & De Datta S.K. (1987): Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. *Plant and Soil* **103**, 155-168.

Walter A. (2001): Räumliche und zeitliche Wachstumsmuster in Wurzeln und Blättern dikotyler Pflanzen, Dissertation Universität Heidelberg.

Walter A. & Schurr U. (1999): The modular character of growth in Nicotiana tabacum plants under steady state nutrition. *Journal of Experimental Botany* **50**, 1169-1177.

Walter A. & Schurr U. (2005): Dynamics of Leaf and Root Growth: Endogenous Control versus Environmental Impact. *Annals of Botany* **95**, 891–900.

Watts W.R. (1972): Leaf Extension in Zea mays. *Journal of Experimental Botany* **23**, 704-12.

Young I.M., Montagou K., Conroy J. & Bengough A.G. (1997): Mechanical impedance of root growth directly reduces leaf elongation rates of cereals. *New Phytologist* **135**, 613-619.

Es ist eine recht umfassende Frage, wem ich in Bezug auf die Diplomarbeit danken will. Es gibt viele Menschen, die mir geholfen haben. Genau wie bessere und schlechtere Phasen in der Arbeit. Meine Erfahrung hat gezeigt, dass Beistand oft genauso wichtig und förderlich ein kann wie der entscheidende fachliche Tipp beim Kaffeetrinken mit Kollegen.

Besonderer Dank gebührt:

Prof. Dr. Folkard Asch, mit dem die Idee zur Konstruktion eines Messgeräts zur Blattlängenmessung bereits im Sommer 2005 entstand. Du hast ziemlich viel Vertrauen und Geduld in mich investiert.

Dr. Manfred Trimborn, der die Betreuung meiner Diplomarbeit vor Ort in Bonn übernahm, nachdem Folkard Asch seinem Ruf nach Stuttgart gefolgt war. Ohne deinen Beistand, wenn schon wieder Blattspitzen abgerissen waren, und vor allem ohne deine Unterstützung mit praktischen Tipps beim Verfassen der Diplomarbeit, hätte ich schon lange ein anderes Thema begonnen.

Unfall auf der Stecke Cottbus – Bonn; Herbst ’07

Danke.

Das „schöner-trockener-forschen-Team Cottbus“ am Bahnhof Cottbus; Sommer ’07