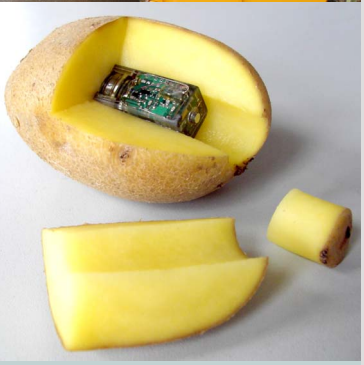
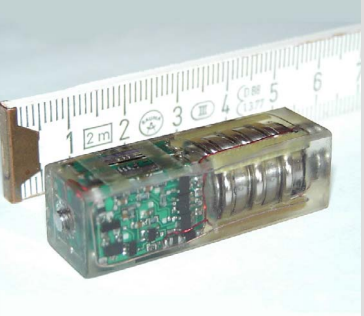
ProSenso.net

ATB
Agrartechnik Bornim





Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren

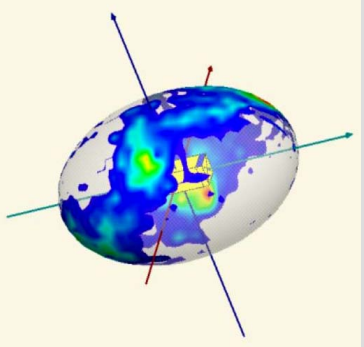
Miniaturised Data Acquisition System for Implanting in Fruits to Measure the Mechanical Load Caused by Harvest and Post-harvest Handling

Gefördert vom:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Mit Unterstützung durch:

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 49

Potsdam-Bornim 2005

Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren

Miniaturised Data Acquisition System for Implanting in Fruits to Measure the Mechanical Load Caused by Harvest and Post-harvest Handling

Gefördert vom:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Mit Unterstützung durch:

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 49

Potsdam-Bornim 2005

Herausgeber:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam
☎ 0331 5699-0
Fax 0331 5699-849
E-Mail atb@atb-potsdam.de
Internet www.atb-potsdam.de

Bearbeiter des ATB:
Dr. Bernd Herold
Dipl.-Ing. Ingo Truppel

Projektpartner:
deka Sensor + Technologie GmbH Teltow
Dr.-Ing. R. Wernecke
Dipl.-Ing. R. Wonneberger

teleBITcom GmbH Teltow
Dr.-Ing. C. Hälsig
Dipl.-Ing. (FH) L. Illmann

Die Bearbeitung erfolgte im Rahmen des BMBF-Förderprogramms "Forschung für die Umwelt" zum Thema

Agrartechnik - Integrierter Umweltschutz in der Landwirtschaft

„Verbesserung der Umweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Produktionsverfahren durch Entwicklung innovativer Sensorik und Gestaltung der Produktionsprozesse im Sinne eines integrierten Umweltschutzes“

Typographische Gestaltung:

Andrea Gabbert

November 2005

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und Unterstützung des Projektträgers des BMBF, Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ).
BMBF-FKZ: 0339992 Teilprojekt 04 (5557)

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2005

Inhaltsverzeichnis

1 Abstrakt 5

2 Abstract 10

I Kurze Darstellung 14

1 Aufgabenstellung 14

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 16

3 Planung und Ablauf des Vorhabens 17

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 18

II Eingehende Darstellung 19

1 Erzieltes Ergebnis 19

2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes 20

3 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 20

4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 24

III Erfolgskontrollbericht 26

1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen 26

2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen 26

3 Fortschreibung des Verwertungsplans 27

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben 30

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer 30

6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung 31

IV Zusammenfassung 31

V Detailbericht ... 33

1 Ergebnisse des Verbundprojekts ... 33

1.1 Zielspezifikation (Aussagen zu Anforderungen an Dimension, Robustheit, Einsatz- und Betriebsbedingungen, Leistungsfähigkeit, Messbereich und Genauigkeit) ... 33
1.2 Entwicklung der Baugruppen (Materialauswahl, Testschaltungen und –aufbauten, Technologieentwicklung, Zuverlässigkeitstests) ... 34
1.2.1 Signalgewinnung, Codierung (A/D-Wandlung) ... 34
1.2.2 Technologie der Datenerfassung/-speicherung ... 34
1.2.3 Der reale Empfänger ... 38
1.2.4 Keramikresonator ... 41
1.2.5 Beschleunigungssensor – Analogschaltung ... 42
1.2.6 Sensorabgleich 3-kanalige Übertragung ... 43
1.2.7 Stromversorgung des Implantats ... 46
1.3 Aufbau- und Montagetechnik für die Teilsysteme (siehe 3.2) ... 48
1.3.1 Implantat ... 48
1.3.1.1 Elektronikblock ... 48
1.3.1.2 Implantatgehäuse ... 51
1.3.2 Empfangseinheit ... 53
1.3.2.1 Hochfrequenzempfänger ... 53
1.3.2.2 Handgerät ... 54
1.4 Software ... 56
1.4.1 Software im Implantat ... 56
1.4.2 Software im Empfänger ... 57
1.4.2.1 Synchronisation ... 57
1.4.2.2 Schnittstelle zum PC ... 57
1.4.2.3 FPGA - konfigurierte Hardware ... 58
1.4.3 Software im PC ... 59
1.5 Kalibrierung ... 62
1.6 Implantierverfahren ... 64
1.7 Erreichte Ergebnisse ... 65

2 Zusammenfassung ... 67

3 Literatur ... 69

Bildverzeichnis ... 71
Tabellenverzeichnis ... 72
Reihe Bornimer Agrartechnische Berichte ... 73

Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren

1 Abstrakt

Obst, Gemüse und Kartoffeln sind empfindliche Produkte – sie werden jedoch in der Praxis häufig wie Schüttgurt behandelt (**Bilder 1** und **2**). Insbesondere Stoßbelastungen bei maschineller Ernte, Transport, Aufbereitung und Verpackung verursachen qualitative und quantitative Verluste von beträchtlicher wirtschaftlicher Bedeutung.

Bild 1: Verladen von Kartoffeln bei der Ernte

Bei Äpfeln sind Druckstellen der mit Abstand häufigste Qualitätsmangel. Bei Speisekartoffeln ist die durch unsachgemäße Behandlung geförderte Schwarzfleckigkeit die häufigste Mängelkategorie. Nach neueren britischen Untersuchungen führen Beschädigungen an den Kartoffeln zu durchschnittlichen Verlusten von rund 300 € pro Hektar und gehören damit zu den größten Risikofaktoren einer erfolgreichen Kartoffelproduktion. Insgesamt werden die tatsächlich verursachten Verluste bei empfindlichen Agrarprodukten auf bis zu 30 % der Marktware beziffert. Es ist notwendig, diese Belastungen als Verlustursache zu reduzieren, die Produktionsverfahren schonender zu gestalten und somit Qualität und Sicherheit empfindlicher Produkte deutlich zu erhöhen. Um die Problemstellen in der Logistik auffinden und die Schadensrisiken quantifizieren zu können, werden räumlich und/oder zeitlich aufgelöste Informationen über die Quellen mechanischer Belastungen benötigt.

Bild 2: Entladen von Kartoffeln nach dem Transport

Ziel des Vorhabens war deshalb, ein miniaturisiertes und energieautarkes Datenerfassungssystem zu entwickeln, dessen Ergebnisse weitgehend auf das reale Produkt übertragbar sind. Bisherige Lösungen setzten auf „elektronische Früchte“, Messsysteme, die äußerlich z. B. als Kugel gestaltet sind und im Innern ausgestattet sind mit elektronischen Sensoren zur Erfassung belastungsrelevanter Größen (Stoßbeschleunigung, dynamischer und statischer Druck). Die „elektronischen Früchte“ durchlaufen gemeinsam mit realen Produkten den Produktionsprozess und erfassen Messdaten über auftretende Belastungen. Die Kugelform hat den messtechnischen Vorteil der symmetrischen Richtungsempfindlichkeit, erweist sich aber bei Abweichung der Originalprodukte von der Kugelform als problematisch. In den logistischen Prozessen sind die Bewegung und Belastung eines Produkts überwiegend von seinen geometrischen und mechanischen Parametern abhängig. Zwischen den Bewegungen einer Kugel und denen von Kartoffelknollen, Möhren etc. im Produktionsprozess bestehen signifikante Unterschiede. Eine dem Originalprodukt in Größe und Form entsprechende Nachbildung der „elektronischen Frucht“ ist bei Industriegütern mit standardisierten, das heißt stets gleichen Parametern gerechtfertigt. Bei Agrarprodukten mit biologisch bedingt hoher Variabilität der Größe und Form ist die Aussagefähigkeit beträchtlich eingeschränkt. Die äußere Gestaltung einer „elektronischen Frucht“ in Form des Originalprodukts verlangt zudem eine Anpassung der messtechnischen Charakteristik, um die erfassten Daten sachgerecht interpretieren zu können. Keine derzeit für die Anwendung in der Agrarwirtschaft bekannte „elektronische Frucht“ berücksichtigt diese Anforderungen hinreichend. Beim Einsatz der „elektronischen Frucht“ zur Bewertung des Schadensrisikos in logistischen

Prozessen ist daher stets mit Fehlern zu rechnen, die eine Optimierung im Hinblick auf schonendes Produkthandling erschweren.

Zur Zeit sind drei Dummy-Messsysteme zur Erfassung der Stoßbelastung von Früchten kommerziell verfügbar, ein Datenloggersystem und zwei Systeme mit telemetrischer Datenübertragung. Für das Datenloggersystem und ein telemetrisches System wurden Schutzrechte vergeben beziehungsweise beantragt, welche jedoch auf die im vorliegenden Projekt entwickelte technische Lösung keinen Einfluss haben.

Die Nachteile der „elektronischen Frucht“ konnten mit dem vorliegenden Projekt überwunden werden. Es gründet auf der Idee, das Originalprodukt selbst als Träger für einen Sensor zu nutzen und damit Belastungsmessungen unter realen Bewegungsbedingungen durchführen zu können. Ein autark betriebenes Sensorsystem wurde soweit miniaturisiert, dass es in eine Kartoffelknolle, eine Möhre oder einen Apfel implantiert werden kann. Seine geometrischen und mechanischen Parameter werden dabei nicht signifikant verändert. Stöße, die häufigste Belastungsursache, werden durch eine triaxiale Beschleunigungsmessung mit hoher Abtastrate aufgenommen und in Echtzeit übertragen. Das fertige System ist ausreichend gegen mechanische und chemische Einwirkungen geschützt. Die technischen Umsetzung eines Implantat mit minimalen Abmessungen basiert auf der Datenerfassung über einen externen Empfänger mittels Telemetrie. Die Vorteile gegenüber einer internen Datenspeicherung (Datenlogger) liegen in der praktisch unbegrenzten Speicherkapazität und der Echtzeitverbindung zum Anwender.

Im Rahmen des Projekts wurde eine innovative technische Lösung zur Erfassung von triaxialen Stoßbeschleunigungsdaten durch ein telemetrisches Messsystem entwickelt. Das neu Messsystem besteht aus zwei Komponenten, einem energieautarken Datensender mit Beschleunigungssensor und einem Datenempfänger (Handgerät). Der Flaschenhals bei der Miniaturisierung eines autarken elektronischen Systems ist die Energieversorgung. Für die eigentliche Sensorelektronik konnte mittels kostengünstiger SMD Technologie eine zufrieden stellende Miniaturisierung erreicht werden. Leistungsfähige Knopfzellenakkus, deren Volumen und Masse etwa 50 % des Sensorteils ausmachen, ermöglichen die Durchführung von Messungen mit der geforderten Qualität. Mit dem implantierbaren miniaturisierten Sensor können so Stoßbelastungen beim Lauf durch die Verfahrensketten der Ernte und Nachernte direkt am Originalprodukt erfasst werden. Die triaxiale Beschleunigung des Produkts wird kontinuierlich mit hoher Abtastrate gemessen. Die Messdaten der drei Achsrichtungen werden vom Datensender über eine zuverlässige Funkverbindung online zum Datenempfänger übertragen und stehen für Echtzeitüberwachung und weitere detaillierte Auswertungen zur Verfügung. Die akustische Wiedergabe von Stoßereignissen online über Kopfhörer erleichtert das visuelle Verfolgen des Bewegungspfades des Datensenders beim Lauf durch die Verfahrensketten. Per Tastendruck am Datenempfänger lässt sich das Passieren ausgewählter Punkte in der Verfahrenskette parallel zu den

Messdaten erfassen. Das Messsystem zeichnet sich durch geringes Gewicht aus. Die Einsatzdauer des Datensenders beträgt mit einer Akkuladung mindestens fünf Stunden. Der autarke Datensender ist nach Größe und Masse kleiner als eine Mignon-Batterie (R6) und lässt sich leicht in einen Apfel, eine Kartoffelknolle oder eine Möhre implantieren.

Das System kann überall dort eingesetzt werden, wo Bewegung, Umschlag und Transport von stoß- und druckempfindlichen Gütern stattfindet. Für die Optimierung der Verfahrenstechnik und der logistischen Prozesse ist der Einsatz des miniaturisierten Datenerfassungs-Systems als spezifisch angepasster Produkt-Dummy von hoher Bedeutung, weil auf diesem Weg eine signifikant höhere Ausbeute an Marktware erreicht werden kann. Das trifft insbesondere für frisches Obst, Gemüse und Kartoffeln, aber auch für empfindliche Industrieprodukte zu. Mit dem neuen Sensorsystem wird ein kostengünstiges Kontrollsystem für Produktionsverfahren zur Verfügung gestellt, das eine Zertifizierung nach ISO 9000 unterstützt und dadurch Sicherheit und Qualität von Agrar- und Industrieprodukten verbessern hilft. Dabei geht es einerseits um das produktschonende Handling in Fließlinien zum Abfüllen oder Verpacken, andererseits um die schonende Transportlogistik im Vertrieb, wo zerbrechliche oder stoßempfindliche Güter durch unzulässig hohe mechanische Belastung häufig beschädigt und unbrauchbar gemacht werden. Darüber hinaus könnte das Messsystem auch in Geräte für spezifisch angepasste Qualitätsprüfungen integriert werden, zum Beispiel für dynamische Elastizitäts- und Dämpfungstests sowohl von technischen Materialien als auch von landwirtschaftlichen Produkten. Im Bereich der Medizin ist das System dort einsetzbar, wo man kleine, leichte und autarke Messsysteme für sportmedizinische und biomechanische Untersuchungen benötigt, um Stöße von Körperteilen gegen den Boden oder ein Hindernis zu analysieren. Auch eine Modifikation der geometrischen Form des miniaturisierten Sensors ist denkbar, zum Beispiel in eine besonders flache Form.

Die größten Effekte eines Sensoreinsatzes zur Reduzierung mechanischer Belastungen sind in der Landwirtschaft zu erwarten. Allein bei Kartoffeln mit einer Anbaufläche von 284.000 ha in Deutschland entstehen jährlich Verluste durch Beschädigung von mehr als 10 %. Entfielen nur 1 % dieser Verluste, könnten jährlich 800.000 € eingespart werden. Das Potenzial der neuen Prüfmethode zur Reduzierung der Verluste liegt jedoch deutlich höher. Bereits bei einer Reduzierung der Verluste um 2 % würde sich die Anwendung der Prüfmethode bei Umschlagmengen ab 20.000 t Kartoffeln (entspricht dem Ertrag einer Anbaufläche von 500 ha) in einem Jahr amortisieren, wenn Kosten von 2.000 € für ein Prüfsystem und ein Personalaufwand von etwa 1.000 € zum Prüfen und Abstellen von Beschädigungsquellen und Reduzierung der Verluste angesetzt werden. Da das Prüfsystem mehrfach, und darüber hinaus auch für andere Produktlinien eingesetzt werden kann, ist ein weitaus höherer wirtschaftlicher Nutzen erzielbar. Der Preis für das neue Messsystem wird voraussichtlich deutlich unter dem für gegenwärtig verfügbare Dummies liegen. Da das Prüfsystem mehrfach, und darüber hinaus auch für

andere Produktlinien eingesetzt werden kann, ist ein weit höherer wirtschaftlicher Nutzen erzielbar.

Das ökologische Potenzial der Sensoranwendung liegt einerseits in einer Reduzierung der erforderlichen Anbaufläche sowie andererseits in einem verringerten Entsorgungsaufwand für Abfall bei der Erzeugung empfindlicher Agrarprodukte. Die weitere Durchdringung der Produktions- und Logistik-Ketten mit erhöhten Anforderungen an das Qualitätsmanagement wird die Anwendungsfelder produktspezifisch angepasster Monitoringsysteme in der Lebensmittelindustrie und der Logistik empfindlicher Industrieprodukte erweitern.

Miniaturised data acquisition system for implanting in fruits to measure the mechanical load caused by harvest and post-harvest handling

2 Abstract

Fruit, vegetables and potatoes are delicate products - but in practice they are often treated like bulk goods. In particular impact stress caused by mechanical harvesting, transport, conditioning and packing causes qualitative and quantitative losses that reach major economic significance. In the case of apples, pressure marks are by far the most frequent quality defect. The black spots caused by incorrect handling of food potatoes are also identified as the most frequent defect category. According to recent British surveys, damage to potatoes leads to average losses of around € 300 per hectare, thus representing one of the largest risk factors for successful potato production. Altogether the losses actually caused to delicate agricultural products are quantified at up to 30 % of the market produce. It is necessary to reduce such mechanical loads as a cause of loss, to design production processes more gently, and thus to substantially increase the quality and safety of delicate products. In order to be able to identify the problem areas in logistics and to quantify the damage risks, spatial and/or time-based information about the sources of mechanical strains is needed.

The objective of the project was therefore to be develop a miniaturised data acquisition system with a self-contained energy source, from which the results can largely be transferred to the real product. Previous solutions focussed on "electronic fruits", measuring systems that are designed externally e.g. as a ball, and equipped internally with electronic sensors for surveying strain-relevant parameters (impact acceleration, dynamic and static pressures). The "electronic fruits" run through the production process together with the real products and capture the measurements of mechanical loads to which they are exposed. The spherical shape has the measurement-specific advantage of symmetrical directional sensitivity, but where it deviates from the original product shape, the ball turns out to be problematic. In logistic processes the movements and mechanical loads affecting a product are largely dependent on its geometrical and mechanical parameters. There are significant differences between the movements of a ball and those of potato tubers, carrots etc. in the production process. A replica of the "electronic fruit" copying the shape and size of the original product is justified for industrial goods with standardised parameters. In the case of agricultural produce with a greater variability in size and shape on the grounds of biological nature, the information capability is substantially restricted. The outer design of an "electronic fruit" in the shape of the original product also requires adaptation of the measuring technology characteristics in order to be able to interpret the captured data properly. None of the "electronic fruits" currently known for applications in agriculture take these requirements into account sufficiently. When the "electronic fruit" is used in logistic

processes to assess the loss risk, errors must therefore constantly be expected and these make it more difficult to optimise gentle product handling.

At present three dummy measuring systems to capture the impact loads to which fruits are exposed are commercially available: one data logger system and two systems with telemetric data transmission. Industrial protection rights have been granted or applications are pending for the data logger system and one telemetric system. However, these have no influence on the technical solution developed in the present project.

The disadvantages of the "electronic fruit" have been overcome by this project. It was based on the idea of using the original product itself as a medium for a sensor and thus being able to carry out strain measurements under real movement conditions. An independently operated sensor system was miniaturised to such an extent that it can be implanted in a potato tuber, a carrot or an apple. Its geometrical and mechanical parameters were not altered significantly. Mechanical impacts, the most frequent cause of strain, were recorded by a triaxial acceleration measurement with a high scanning rate and transmitted online. The finished system is sufficiently protected against mechanical and chemical influences. The technical implementation of an implant with minimal dimensions is based on data acquisition via an external receiver using telemetry. The advantages by comparison with internal data storage (data logger) lie in the practically unlimited storage capacity and online connection to the user.

An innovative technical solution for capturing triaxial impact acceleration data by a telemetric measuring system was developed within the framework of the project. The measuring system consists of two components, a data transmitter with an acceleration sensor and a self-contained energy system, and a data receiver (manual device).

The bottleneck in miniaturising an independent electronic system is the energy supply. With the aid of low-cost SMD technology, it was possible to achieve satisfactory miniaturisation for the actual sensor electronics. High-performing button cell accumulators, whose volume and mass account for more than 50 % of the sensor component, make it possible to carry out measurements of the required quality. This means that impact loads can be surveyed directly on the original product with the implantable miniaturised sensor as it passes through the process chains of harvesting and post-harvesting. The triaxial acceleration of the product is continuously measured with high scanning rates. The measuring data of the three axial directions are transmitted online by the data transmitter to the data receiver via a reliable radio connection and are available for real time surveillance and further detailed evaluations. The acoustic reproduction of impact occurrences online via headphones facilitates the visual tracking of the movement paths of the data transmitter as it passes through the process chain. By pressing a key on the data receiver it is possible to capture the passage of selected points in the process chain parallel with the measuring

data. The measuring system is characterised by low weight. With a fully charged accumulator battery the data transmitter can work for at least five hours. The self-contained data transmitter is smaller than a mignon battery (R6) as regards size and mass and can easily be implanted in an apple, a potato tuber or a carrot.

The system can be used wherever movement, handling and transport of goods sensitive to impact loads and dynamic pressure takes place. The use of the miniaturised data acquisition system as a specifically adapted product dummy is highly important for optimising the process technology and logistic processes because in this way significantly higher yield of market merchandise can be achieved. This applies especially for fresh fruit, vegetables, and potatoes, as well as for delicate industrial products. The new measuring system provides a low-cost control method for production lines, that gives support for the certification according to ISO 9000, and help for improving the safety and quality of agricultural and industrial products. In such cases it is important on the one hand to ensure gentle product treatment in flow lines to filling or packing stations, and on the other hand to ensure gentle transport logistics in distribution, where fragile or delicate goods are frequently damaged and rendered unfit for use by inadmissibly high mechanical strains. Furthermore, it was possible to integrate the measuring system into instruments for specifically adapted quality tests too, for example for dynamic elasticity and attenuation tests of both technical materials and agricultural produce. In the field of medicine the system can be used wherever small, light and self-contained measuring systems are needed for medical and biomechanical examinations in order to analyse shocks of body parts against the ground or an obstacle. A modification of the geometrical shape of the miniaturised sensor is also conceivable, for example in a particularly flat form.

The greatest effects of a sensor application for reducing mechanical loads can be expected in agriculture. For potatoes alone, with a cultivated area of 284,000 hectares in Germany, losses of more than 10 % are caused by mechanical damage each year. If only 1 % of these losses could be avoided, a sum of € 800,000 could be saved each year. The potential of the new testing method for loss reduction is much higher, however. If losses were reduced by just 2 %, use of the test method for quantities of 10,000 t and more potatoes handled (representing the yield of a cultivated area of 500 hectares) would make itself paid within one year, because the costs are estimated for one test control unit to be lower than 2000 €, and for personnel to carry out the check and to adjust the handling technique for reduced damage losses not higher than 1000 €. Presumably, the price of the new measuring system will be well below that for the dummies currently available. Since the test system can also be used several times and for other product lines too, a much higher economic benefit can be achieved.

The ecological potential of the sensor application lies on the one hand in a reduction of the area of cultivation necessary, and on the other hand in reduced disposal costs for waste in the production of delicate agricultural products. As the benefits pass further through the production and logistic chains with enhanced requirements made of quality management, the fields of application of product-specifically adapted monitoring systems in the food industry and logistics will be expanded to delicate industrial products.

I Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Empfindliche Produkte werden in logistischen Prozessen häufig intensiven Bewegungen unterworfen. Dabei entstehen zwangsläufig unerwünschte mechanische Belastungen verbunden mit einem hohen Schadens- und Verlustrisiko. Zum Beispiel wurden in den zurückliegenden Jahren bei Erhebungen im Einzelhandel in Bayern bei Äpfeln Druckstellen als mit Abstand häufigster Qualitätsmangel festgestellt. Als Konsequenz soll geprüft werden, ob durch eine optimierte Kombination von Produktionstechnik, Sortenwahl, Lagerung und Verpackungsmaterialien sowie einer optimalen Logistik und Präsentation insbesondere Druckstellen verringert werden können (SUTOR 2005). Auch bei Speisekartoffeln sind schwere Schäden und durch lange Lagerung oder unsachgemäße Behandlung geförderte Schwarzfleckigkeit häufigste Mängelkategorie (STOLPER 2005). Nach neueren britischen Untersuchungen führen Beschädigungen an den Kartoffeln zu durchschnittlichen Verlusten von rund 300 € pro Hektar und gehören damit zu den größten Risikofaktoren einer erfolgreichen Kartoffelproduktion (PETERS 2004). In entwickelten Ländern werden die tatsächlich verursachten Verluste bei empfindlichen Agrarprodukten insgesamt bis zu 30 % der Marktware beziffert.

Um einerseits die durch Verluste bedingten Ausfälle zu kompensieren und andererseits die verursachten Abfälle zu entsorgen, ergeben sich erhebliche ökologische Wirkungen. Die Probleme sind bekannt aus der Verfahrenskette bei empfindlichen Agrarprodukten von der Ernte bis zum Handel, aber ebenfalls in der Logistik von Industriegütern (GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V. 1999). Wegen der komplizierten Zusammenhänge und Einflussfaktoren bei als Schüttgut behandelten Produkten wie beispielsweise Kartoffeln, Möhren und Äpfeln gibt es im allgemeinen keine Lösung zur Prozessoptimierung auf theoretischem Wege.

Um die Problemstellen in der Logistik auffinden und die Schadensrisiken quantifizieren zu können, kommen deshalb in erster Linie empirische Methoden in Betracht. Da die Schadensanalyse am Originalprodukt wenig geeignet ist zur Aufdeckung und Lokalisierung der eigentlichen Schadensursache, werden räumlich und/oder zeitlich aufgelöste Informationen über die Quellen mechanischer Belastungen benötigt. Zu diesem Zweck kann man einen mit Sensoren bestückten Dummy durch die Prozesse laufen lassen. In der Agrarwirtschaft bezeichnet man einen solchen Dummy auch als „elektronische Frucht“ oder als „simuliertes elektronisches Produkt“ (**Bild 3**) (TENNES *et al.* 1990, HEROLD *et al.* 1996, MILNE 1995, BARREIRO *et al.* 1997).

Eine „elektronische Frucht“ ist zum Beispiel äußerlich als Kugel gestaltet und im Innern mit elektronischen Sensoren zur Erfassung belastungsrelevanter Größen (Stoßbeschleunigung, dynamischer und statischer Druck) bestückt. Die Kugelform hat den

messtechnischen Vorteil der symmetrischen Richtungsempfindlichkeit, erweist sich aber bei Abweichung der Originalprodukte von der Kugelform als problematisch. In den logistischen Prozessen sind die Bewegung und Belastung eines Produkts überwiegend von seinen geometrischen und mechanischen Parametern abhängig. Deshalb bestehen signifikante Unterschiede zwischen den Bewegungen einer Kugel und denen von Kartoffelknollen, Möhren etc. Aus diesem Grund wurden auch Versuche unternommen, die „elektronische Frucht“ äußerlich dem Originalprodukt ähnlich nachzubilden (FECHNER *et al.* 2000, VAN CANNEYT *et al.* 2003, SMART SPUD INFORMATION AND SPECIFICATION 2003, SELJASEN *et al.* 2001).

Bild 3: Unterschiedliche „elektronische Früchte“ im Vergleich (Stand 1995, von links nach rechts: PTR-100 aus Dänemark, PMS-60 aus Deutschland, Damage Detective aus UK, und IS100 aus USA)

Diese Vorgehensweise ist bei Industriegütern mit standardisierten, das heißt stets gleichen Parametern gerechtfertigt, führt aber bei Agrarprodukten mit biologisch bedingt hoher Variabilität der Größe und Form zu beträchtlichen Einschränkungen der Aussagefähigkeit. Hinzu kommt, dass die äußere Gestaltung einer „elektronischen Frucht“ wie ein Originalprodukt zusätzlich eine entsprechende Anpassung der messtechnischen Charakteristik verlangt, um die erfassten Daten sachgerecht interpretieren zu können. Inwieweit diese Anforderungen erfüllt werden können, wird wesentlich durch den vorliegenden Stand der technischen Entwicklung insbesondere der Miniaturisierung bestimmt. Keine derzeit für die Anwendung in der Agrarwirtschaft bekannte „elektronische Frucht“ berücksichtigt hinreichend diese Anforderungen. Infolgedessen sind die erfassten Belastungswerte nur mit Einschränkung auf das Originalprodukt übertragbar. Beim Einsatz der „elektronischen Frucht“ zur Bewertung des Schadensrisikos in logistischen Prozessen ist daher stets mit Fehlern zu rechnen, welche eine Optimierung im Hinblick auf schonendes Produkthandling erschweren.

Die Herausforderung dieses Vorhabens bestand darin, ein miniaturisiertes System zu entwickeln, welches die genannten Anforderungen weitgehend erfüllt. Insbesondere sollten die Belastungsmessungen unter realen Bewegungsbedingungen erfolgen. Dadurch sollte gewährleistet werden, dass sich die Ergebnisse auf das Originalprodukt übertragen lassen.

Die Idee zur Realisierung eines geeigneten Systems war, das Originalprodukt selbst als Träger für einen Sensor ähnlich wie eine „elektronische Frucht“ zu nutzen. Dabei sollten die geometrischen und mechanischen Produktparameter nicht signifikant verändert werden. Das bedeutete, ein autark betriebenes Sensorsystem soweit zu miniaturisieren, dass es in eine Kartoffelknolle, eine Möhre oder einen Apfel passt und implantiert werden kann (HEROLD *et al.* 2002, HEROLD *et al.* 2004).

Zur technischen Umsetzung dieser Idee gibt es zwei Grundvarianten: die interne Datenspeicherung oder die Datenübertragung nach außen und Erfassung über ein externes System. Beide Varianten haben spezifische Vor- und Nachteile, welche unten näher dargestellt werden. Nach Abwägung der unterschiedlichen Faktoren wurde auf eine Variante mit telemetrischer Übertragung und Erfassung der Daten über einen externen Empfänger orientiert. Diese Orientierung erfolgte vor allem im Hinblick darauf, ein Implantat mit minimalen Abmessungen technisch zu realisieren.

In den Ernte- und Nachernte-Verfahren für Agrarprodukte wie Kartoffeln u. a. überwiegen die Stoßbelastungen. Diese sollten durch eine triaxiale Beschleunigungsmessung mit hoher Abtastrate aufgenommen und in Echtzeit übertragen werden. Hierfür war eine genügend hohe elektrische Leistung bereit zu stellen. Es zeigte sich bald, dass die erforderliche Energieversorgung zum Flaschenhals für die Miniaturisierung des autarken elektronischen Systems werden würde. Daher erschien SMD Technologie hinreichend, um die elektronischen Funktionsbaugruppen zu miniaturisieren. Schließlich war das komplette Implantat auf geeignete Weise einzuhausen, um es gegen mechanische und chemische Einwirkungen zuverlässig zu schützen.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Koordinierung der Projektarbeiten erfolgte durch das Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), das über eine langjährige Tradition auf dem Gebiet der Belastungsmesung verfügt. Bereits in den 1960er Jahren wurden am damaligen Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim erste Versuche mit Messkugeln zur elektrischen Messung mechanischer Belastungen von Kartoffeln beim Roden durchgeführt (BAGANZ & ZIEMS 1967, DAVID 1968). Diese Messverfahren wurden ständig verbessert und als Forschungsinstrument etabliert (HEROLD & SIERING 1974, HEROLD & HABELT 1992). Die Entwicklung der Mikroprozessortechnik liefert Impulse, die ab 1990 zum Aufbau von autark betriebenen Messkugeln als künstliche Früchte mit internem Datenlogger zur Erfassung der mechanischen Belastungen bei unterschiedlichen Produkten führten (TENNES *et al.* 1990, HEROLD *et al.*1996). Da beide Industriepartner zwar über geeignete technologische Voraussetzungen für die Entwicklung entsprechender Messsysteme, jedoch wenig

spezifische Erfahrungen zu der konkreten Aufgabenstellung und den Einsatzbedingungen verfügten, war ein schrittweise Vorgehen bei der Bearbeitung zweckmäßig.

Für das Zusammenwirken der Partner wurde eine sinnvolle Struktur gewählt (**Bild 4**). Die Zuordnung der Industriepartner als Auftragnehmer hatte Vor- und Nachteile. Von Vorteil war, dass das ATB als Auftraggeber in der Lage war, die Gesamtkoordinierung in einer Hand zu behalten. Dadurch konnte durchgesetzt werden, dass trotz auftretender Schwierigkeiten die anfangs gesetzten Zielparameter durch entsprechende Anpassung der Projektphasen im wesentlichen erreicht wurden. Nachteilig ist einzuschätzen, dass für die Industriepartner in der Position des Auftragnehmers nur geringer Anreiz zu eigenschöpferischer Initiative in kritischen Projektphasen gegeben war. Im speziellen Falle dieses schwierigen Projekts wird jedoch die gegebene Konstellation als geeignet zur Erfüllung der Aufgabenstellung angesehen, da sich die Industriepartner andernfalls mit hohem Aufwand tiefgründig in spezifisch landwirtschaftliche und landtechnische Fragestellungen hätten einarbeiten müssen.

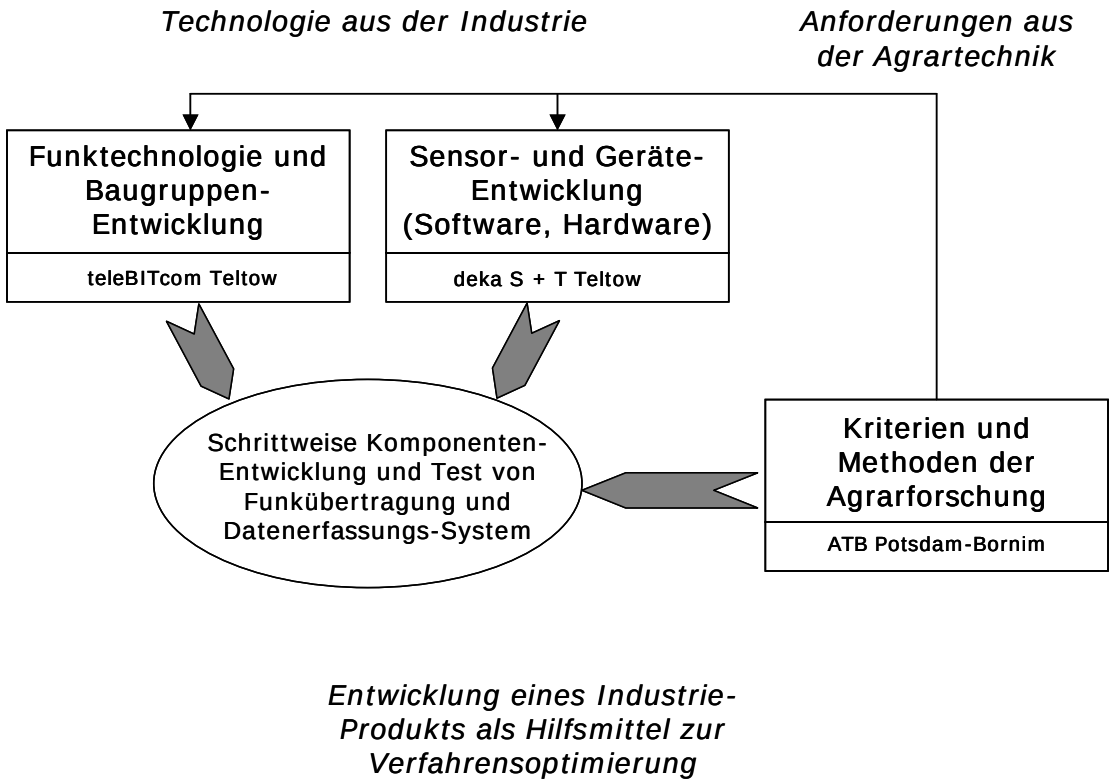


Bild 4 Struktur der Zusammenarbeit der Projektpartner

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde ursprünglich über eine Laufzeit von zwei Jahren geplant. Die Abfolge der Arbeitspakete war folgerichtig geplant. Jedoch traten während der Bearbeitung be-

trächtliche Schwierigkeiten bei der Entwicklung einer ausreichend zuverlässigen telemetrischen Datenübertragung auf. Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten wurde erheblich mehr Zeit benötigt als zunächst veranschlagt. Über die anfänglich Zielstellung hinaus gehend wurde der Umfang der übertragenen Information modifiziert, was zu einer qualitativen und quantitativen Aufwertung des Systems führte.

Wegen der Verzögerung wurde in Abweichung von der anfänglichen Planung eine Verschiebung des Projektabschlusses bis Ende 2004 notwendig. Diese Verlängerung liegt innerhalb des durch das Verbundprojekt gespannten Zeitrahmens. Sie erfolgte in Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber und wurde kostenneutral gehalten.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

– Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Technische Entwicklungen und kommerzielle Systeme zur Erfassung der Stoßbelastung empfindlicher Agrarprodukte sind vor allem aus der einschlägigen landwirtschaftlichen Fachpresse und aus dem Internet bekannt. Jedoch sind hierzu nur in wenigen Fällen Schutzrechte beantragt worden. Hierzu ist grundsätzlich festzustellen, dass Systeme zur Erfassung der mechanischen Belastung von empfindlichen Produkten nur in relativ geringer Stückzahl zu vermarkten sind. Man muss daher annehmen, dass die Anmeldung von Schutzrechten für solche Systeme auf kein nennenswertes wirtschaftliches Interesse stößt.

Derzeit sind drei Dummy-Messsysteme zur Erfassung der Stoßbelastung von Früchten kommerziell verfügbar, ein Datenloggersystem und zwei Systeme mit telemetrischer Datenübertragung (siehe Punkt II.3.). Für das Datenloggersystem und ein telemetrisches System wurden Schutzrechte vergeben beziehungsweise beantragt, welche jedoch nicht für die im vorliegenden Projekt entwickelte technische Lösung benutzt wurden und auch keinen Einfluss darauf haben.

– Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Für die Recherche zu diesem sehr spezifischen Thema, welches über allgemeine Anfragen äußerst schwer zugänglich ist, wurden auf Grund der gesammelten Erfahrungen schwerpunktmäßig die einschlägigen Fachzeitschriften auf landwirtschaftlich-gartenbauliche Gebiet mit dem Fokus auf Technik genutzt, welche von den Bearbeitern seit langem durchgesehen und ausgewertet werden. Diese Zeitschriften sind einerseits in der Bibliothek des ATB, aber auch über das angeschlossene Bibliotheksnetz verfügbar. Außerdem wurden beziehungsweise werden Publikationen von fachbezogenen internatio-

nalen Konferenzen und Informationen im Internet durchgesehen. Insbesondere wurden folgende Datenquellen recherchiert:

http://www.depatisnet.de

http://isiknowledge.com (ISI web of science)

http://www.google.de

II Eingehende Darstellung

1 Erzieltes Ergebnis

Im Rahmen des Projekts wurde eine innovative technische Lösung zur Erfassung von triaxialen Stoßbeschleunigungsdaten durch ein telemetrisches Messsystem entwickelt. Das neu entwickelte Messsystem besteht aus zwei Komponenten, einem autarken Datensender (mit Beschleunigungssensor) und einem Datenempfänger. Die Besonderheit dieser Entwicklung liegt darin, dass mit vertretbarem Kostenaufwand eine erhebliche Miniaturisierung gegenüber dem Stand der Technik erreicht werden konnte. Die erzielten Ergebnisse sind im einzelnen in Anlage 1 dieses Berichts dargestellt.

Die Miniaturisierung des Datensenders wird hauptsächlich durch die Energiequelle begrenzt. Um die Messung mit der geforderten Qualität durchzuführen, wurden leistungsfähige Knopfzellenakkus benötigt, deren Volumen und Masse mehr als 50 % des Sensorteils ausmachen. Für die eigentliche Sensorelektronik konnte daher mittels kostengünstiger SMD Technologie eine zufrieden stellende Miniaturisierung erreicht werden.

Der autarke Datensender ist nach Größe und Masse kleiner als eine Mignon-Batterie (R6) und lässt sich wie vorgesehen in einen Apfel, eine Kartoffelknolle oder eine Möhre implantieren. Somit kann direkt am Originalprodukt die Stoßbelastung beim Lauf durch Verfahrensketten der Ernte und Nachernte erfasst werden.

Die triaxiale Beschleunigung des Produkts wird kontinuierlich mit hoher Abtastrate erfasst. Die Messdaten der drei Achsrichtungen werden vom Datensender über eine zuverlässige Funkverbindung online zum Datenempfänger übertragen und stehen für Echtzeitüberwachung und weitere detaillierte Auswertungen zur Verfügung.

Das Messsystem ist leicht tragbar. Das visuelle Verfolgen des Bewegungspfades des Datensenders beim Lauf durch eine Verfahrenskette wird erleichtert durch online akustische Wiedergabe von Stoßereignissen über Kopfhörer. Per Tastendruck am Datenempfänger lässt sich das Passieren ausgewählter Punkte in der Verfahrenskette parallel zu den Messdaten erfassen. Die Einsatzdauer des Datensenders beträgt mit einer Akkuladung mindestens fünf Stunden.

2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Mit dem erfolgreichen Abschluss des Projekts TP04 bestehen zwei grundsätzliche Verwertungsrichtungen: die wissenschaftlich-technische und die wirtschaftliche Verwertung.

Der Nutzen hinsichtlich wissenschaftlich-technischer Verwertung wird im Erkenntnisgewinn bestehen. Dazu werden im laufenden Jahr Untersuchungen und Tests durchgeführt werden. Darüber hinaus wird ein Nutzen aus der möglichen Ausdehnung der Anwendbarkeit durch ein Nachfolgeprojekt erwartet.

Der Nutzen hinsichtlich wirtschaftlicher Verwertung ist schwer zu beurteilen. Die beteiligten Industriepartner bekräftigten ihr Interesse an einer wirtschaftlichen Verwertung, wobei noch einige marktvorbereitende Schritte zur Beurteilung der Verwertbarkeit notwendig sein werden.

Die Vermarktung sollte sich zunächst entsprechend der Ausrichtung des Projekts auf Anwendung in der Landwirtschaft orientieren. Wenn man den eingangs genannten Ansatz zur Verlustschätzung durch mechanische Beschädigung unterstellt, würden in Deutschland allein bei Kartoffeln mit einer Anbaufläche von 284.000 ha Verluste von jährlich über 80 Mio. € entstehen. Das entspricht ungefähr einem Warenverlust von mehr als 10 %. Wenn nur 1 % dieser Verluste (80 Mio. € = 100 %) entfielen, würde man jährlich 800.000 € einsparen können. Das Potenzial der neuen Prüfmethode zur Reduzierung der Verluste wird jedoch auf mehrere Prozent geschätzt.

Bei Kosten von 2.000 € für ein Prüfsystem und geschätzten Personalaufwand von etwa 1.000 € zum Prüfen und Abstellen von Beschädigungsquellen und Reduzierung der Verluste um 2 % würde sich die Anwendung der Prüfmethode bei Umschlagmengen ab 20.000 t Kartoffeln (entspricht dem Ertrag einer Anbaufläche von 500 ha) bereits in einem Jahr rentieren. Da das Prüfsystem mehrfach, und darüber hinaus auch für andere Produktlinien eingesetzt werden kann, ist ein weitaus höherer wirtschaftlicher Nutzen erzielbar.

3 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden während der Durchführung des Vorhabens keine Fortschritte bei anderen Stellen bekannt. Dazu wurde die einschlägige Literatur verfolgt, Tagungsbeiträge von wissenschaftlichen Konferenzen ausgewertet und Fachgespräche geführt (**Tabelle 1**).

Recherchiert wurde nach Patenten in den für diese Systeme relevanten Klassen G01P 15/04, G04F 5/00 und G01L 5/00. Hier gibt es innerhalb des Durchführungszeitraums keine neuen Erkenntnisse. Die erste zu nennende Anmeldung bezieht sich auf die in

den USA entwickelte „Instrumented Sphere“ (TENNES *et al.* 1990), deren grundlegende Konstruktion erstmalig im Jahre 1988 als „Impact detection apparatus“ durch US 4,745,564 patentiert wurde. Hier handelt es sich um einen Datenlogger, also ein System mit interner Datenspeicherung, und der Möglichkeit, diese Daten nach erfolgter Aufzeichnung in einen Computer auszulesen und weiter auszuwerten. Die Datenerfassung mit Hilfe eines solchen Systems ist sehr zuverlässig, jedoch stehen die erfassten Daten nicht online zur Verfügung. Die ursprüngliche Ausführung in Kugelform wird inzwischen in mehreren Modifikationen, unter anderem in rundlich abgeflachter Form ähnlich einer Kartoffel angeboten (**Bild 5**).

Bild 5: Stoßrekorder I.R.D. (impact recording device) von TECHMARK (USA)

Zwei weitere Anmeldungen mit Datenaufzeichnung in der Vorrichtung wurden 1991 durch EP 0405840 als „Impact memorizing unit“ und 1995 durch US 5,426,595 als „Portable autonomous device for the detection and recording of randomly occurring phenomena of short duration“ patentiert. Beide beziehen sich auf Shockrecorder zur Langzeitüberwachung von Transportvorgängen.

Eine von der Konstruktion her dem vorliegenden Projekt grundsätzlich nahe stehende Anmeldung wurde 1999 als „Impact measuring device for delicate and fragile articles“ durch CA 2,237,295 veröffentlicht. Schutz wird beansprucht für Vorrichtung und Verfahren zur Messung von Stößen. Die Vorrichtung besteht aus einem Stoßmess-Modul und einer Empfangs-Einheit, welche derzeit von der Firma Sensor Wireless, Inc. kommerziell angeboten wird (**Bild 6**) (SMART SPUD INFORMATION ..., 2003).

Bild 6: „Smart Spud“ System von SENSOR WIRELESS (Kanada)

Das Stoßmess-Modul ist gekennzeichnet durch Stromquelle, Stoßmess-Mittel zur Erfassung der Modulbewegung, Mittel zur drahtlosen Übertragung der gemessenen Stoßdaten, und eine elektronische Schaltung zur Verknüpfung von Stromquelle, Stoßmess-Mittel und Datenübertragungs-Mittel. Die Empfangs-Einheit ist entfernt positioniert und gekennzeichnet durch Stromquelle, Datenempfangs-Mittel für die gesendeten Stoßdaten und elektronische Schaltung zu deren Verknüpfung. Weiterhin wird Schutz beansprucht für die Ausführung des Stoßmess-Mittels als Beschleunigungssensor und triaxialer Beschleunigungssensor sowie, dass die Empfangs-Einheit Mittel zur Aufzeichnung und Speicherung der empfangenen Daten enthält, das Aufzeichnungs-Mittel einen RAM enthält, und die Empfangs-Einheit Mittel zum Herunterladen der gespeicherten Daten in einen Computer enthält. Darüber hinaus kann die Empfangs-Einheit Mittel zur Ereignismarkierung enthalten, um das Auftreten bestimmter Ereignisse korreliert zum aufgezeichneten Datenstrom aufzuzeichnen. Ferner ist die Datenübertragung mittels Radiowellen beschrieben. Schutz wird auch beansprucht für spezifische Gestaltungsformen des Stoßmess-Moduls, angepasst an durchschnittliche Form und Gewicht von Kartoffel, Apfel, Orange und Tomate. Die Verfahrensansprüche sind äquivalent zu denen für die Vorrichtung. Diese Schutzrechtsanmeldung beinhaltet keine wirklichen Neuheiten.

Denn Vorrichtungen und Verfahren für einen solchen Produkt-Dummy existieren schon länger und wurden auch in der Fachpresse publiziert. Gegenwärtig besteht auch eine hierzu konkurrierende technische Lösung (VAN CANNEYT *et al.* 2003), welche in Dänemark als kommerzielles Produkt entwickelt und hergestellt wird, und zumindest in Europa als „Electronic Potato“ zunächst als Modell PTR-100 und als weiterentwickeltes Modell PTR-200 eine nennenswerte Verbreitung gefunden hat (**Bild 7**). Allerdings konnte für die dänische Entwicklung keine Schutzrechtsanmeldung gefunden werden.

Bild 7: Elektronische Kartoffel PTR-200 von SM Engineering (Dänemark)

Tabelle 1: Übersicht über kommerzielle miniaturisierte Stoßdatenerfassungssysteme

System	Variante [1])	Länge mm	Breite mm	Masse g	Messbereich G [2])	Auflösung bit	Abtastrate kHz	Preis
I.R.D.	D	83	70	-	500	8	5	4.500 US$
ShockLogger II (Maße für LP)	D	60	45	35	50 oder 500	12	20	10.000 €
SSP/3D	D	81	38	200	-	12	1,2	-
SA-600	D	111	89	364	50	12	1	599 US$
PTR-200	T	83	53	170	150	-	0,1	2.350 €
CrackLess System (Smart Spud)	T	64	46	56	100	8	10	7.500 US$

[1]) D – Datalogger, T – Telemetrie, [2]) 1G = 9,81 m/s²

Die beiden letztgenannten Entwicklungen weisen mehrere Nachteile auf, welche ihre Einsatzmöglichkeiten einschränken:

1. Die Systeme sind nicht an spezifische Parameter (Form, Masse etc.) eines Produkts anpassbar, welche von der vorgegebenen Konstruktion abweichen,
2. Die drahtlose Datenübertragung ist nur begrenzt zuverlässig und führt zu einer relativ hohen für den Nutzer nicht erkennbaren Fehlerrate,
3. Die übertragenen Daten reichen nicht aus, um Stoßvorgänge vollständig bewerten zu können; dies bezieht sich insbesondere auf die zeitliche Auflösung der Datenaufzeichnung und die Kennzeichnung der Stoßrichtung,
4. Die Einsatzdauer beim Nutzer ist begrenzt auf die Kapazität der eingesetzten Batterien; nach deren Entladung benötigt der Nutzer die Hilfe des Herstellers.

Im Ergebnis des vorliegenden Projekts sollten diese Nachteile überwunden werden.

4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Bisher wurde relativ zurückhaltend publiziert. Dafür gab es zwei Gründe: 1. das Risiko für einen erfolgreichen Projektabschluss war bis zum Projektende relativ hoch, 2. vorzeitige Publikation könnte für schutzrechtliche Maßnahmen neuheitsschädigend wirken.

Die ersten Publikationen erfolgten in Form von Postern auf verschiedenen wissenschaftlichen Konferenzen, in einer Rundfunksendung und als Zeitschriftenartikel:

- **HEROLD B., TRUPPEL I., GEYER M., HOFFMANN TH. (2002):** A new approach to detect mechanical impacts onto potato tubers. Poster. EAPR2002, 14.-19.07.2002, Hamburg (Abstracts of Papers and Posters, Poster 52, p. 246, ISSN 0723-7812)
- **HEROLD B., TRUPPEL I., GEYER M., HOFFMANN TH. (2004):** Implantation of impact measuring device into a real potato tuber. Poster. Meeting of EAPR Section Engineering in Prague. 19.-23.4.2004
- **LEßMÖLLMANN A. (2003):** Sensoren für die Landwirtschaft - Wie Hightech im Gartenbau eingesetzt wird. Hörfunkbeitrag des NDR, Wissenschaftsmagazin LOGO 25.4.03
- **HEROLD B., TRUPPEL I., JACOBS A., GEYER M. (2005):** Stoßdetektor zum Implantieren in empfindliche Früchte. Landtechnik 60 (2005) 4, 208-209
- **ANONYM (2005):** Gemüse-Implantat. P.M. Magazin, Oktober 2005, S. 26

Auf dem Statusseminar des Verbundvorhabens „Hightech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion“ und auf weiteren Konferenzen erfolgte die Präsentation als Poster bzw. Vortrag:

- **HEROLD B., TRUPPEL I., WERNECKE R., HÄLSIG C. (2003):** Miniaturisiertes Datenerfassungs-System. Poster und Vortrag. Statusseminar 29./30.09.2003 Potsdam

- **HEROLD B., TRUPPEL I., GEYER M. (2004):** Stand und Entwicklungstendenzen bei „elektronischen Früchten“ zur Bestimmung mechanischer Belastungen und weiterer Parameter. Vortrag. 41. Gartenbauwissenschaftliche Tagung in Wien vom 25.-28.02.2004 (BDGL-Schriftenreihe Bd. 22, 2004, S. 92) ISSN 1613-088X
- **HEROLD B., TRUPPEL I., GEYER M. (2004):** Mechanical impact detector implanted in perishable produce. Poster. Second International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Bio-Systems Engineering (ISMAB2004), Sept.21-23, 2004, Kobe University, Japan
- **HEROLD B., TRUPPEL I., GEYER M. (2005):** Miniaturised sensor to detect mechanical impacts on real perishables. Poster. 7th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering (FRUTIC 05), Sept. 12-16, 2005, Montpellier, Frankreich

Eine deutsche Gebrauchsmusteranmeldung wurde in Zusammenarbeit mit der Zukunfts-Agentur Brandenburg, brainshell, durchgeführt (Titel: „Vorrichtung zur Erfassung und Online-Übertragung von Bewegungsdaten empfindlicher Güter in logistischen Prozessen“, Aktenzeichen 20 2005 017 113.1 vom 28.10.2005).

Eine Demonstration des entwickelten Gerätesystems erfolgte während der AGRITECHNICA in Hannover vom 06. – 12.11.2005. Weitere Publikationen werden in den nächsten Jahren folgen.

III Erfolgskontrollbericht

1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Wie im Punkt II.2 dargestellt, wird ein Nutzen durch deutliche Reduzierung der durch mechanische Beschädigung bedingten Verluste bei empfindlichen Agrarprodukten erwartet. Die tatsächlichen Warenverluste sind schwer zu ermitteln. Sie betragen nach neueren Angaben in den hoch entwickelten europäischen Ländern um 10 %, darüber hinaus liegen Angaben um 30 % vor. Die beträchtlichen Warenumsätze an diesen Produkten lassen bei Verlustreduzierung um bereits wenige Prozente durch Optimierung der Produktionsverfahren auch enorme Effekte für die Entlastung der Umwelt erwarten. Wenn die Verluste gesenkt werden, lässt sich die erforderliche Anbaufläche und ebenso der Aufwand für die Abfallentsorgung verringern. Mit Hilfe des in diesem Vorhaben entwickelten miniaturisierten Datenerfassungs-Systems kann deshalb ein wichtiger Beitrag zu den förderpolitischen Zielen geleistet werden.

2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Das wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens besteht hauptsächlich in der Bereitstellung eines innovativen Hilfsmittels zur Bewertung der mechanischen Belastung von empfindlichen Agrarprodukten. Durch die erreichte Miniaturisierung wird es gegenüber dem bisherigen Stand der Technik möglich, die Belastung des realen Produkts zu erfassen und somit erstmals die Übertragbarkeit der gemessenen Daten zu gewährleisten. Dadurch kann das Beschädigungsrisiko sicherer beurteilt werden.

Bisher bestanden zwischen dem zur Datenerfassung eingesetzten Produkt-Dummy und dem realen Produkt erhebliche Differenzen, welche zu signifikanten Fehlern führten. Das neu entwickelte System besteht aus einem Datensender, welcher direkt in das reale Produkt implantiert wird, und einem Datenempfänger, der von der Bedienperson getragen wird.

Das neu entwickelte System soll in der folgenden Periode zur Untersuchung der Verfahren eingesetzt werden, um entsprechende Daten zu sammeln, zu vergleichen mit bisher verwendeten Systemen und Aussagen über Optimierungspotenziale zu verbessern.

Nebenergebnisse liegen in Form der entwickelten Telemetrielösung vor, welche möglicherweise weitere Anwendungsmöglichkeiten bietet.

Wegen der umfangreichen erforderlichen Entwicklungszeit für das neue System liegen derzeit noch relativ wenig Erfahrungen über die praktische Anwendung vor. Während dieser Entwicklung wurde insbesondere die telemetrische Datenübertragung sowie das

Implantierungsverfahren für den Datensender unter Praxisbedingungen der Kartoffelaufbereitung und Vermarktung getestet.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Die Verwertung der erreichten Ergebnisse wird in den folgenden vier Punkten beschrieben:

- Erfindungen

Im Ergebnis des Projekts wurde im Jahre 2005 beim Deutschen Patent- und Markenamt eine Gebrauchsmusteranmeldung unter dem vorläufigen Titel „Vorrichtung zur Erfassung und Online-Übertragung von Bewegungsdaten empfindlicher Güter in logistischen Prozessen“ (Aktenzeichen 20 2005 017 113.1 vom 28.10.2005) vom ATB Potsdam-Bornim in Zusammenarbeit mit der ZukunftsAgentur Brandenburg, brainshell, durchgeführt. Eine entsprechende Patentanmeldung an Stelle dessen erscheint wegen des ungünstigen Verhältnisses von erforderlichem Aufwand und zu erwartendem Nutzen nicht zweckmäßig.

- Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien

Bild 8: Messestand zur Demonstration des implantierbaren Stoßsensors auf der AGRITECHNICA 2005 in Hannover (Rundlauf mit drei Gurtbandförderern)

Erste konkrete Schritte zur Umsetzung der entwickelten technischen Lösung wurden durch Publikationen in der Fachpresse und auf Tagungen sowie durch Präsentation auf der weltgrößten Landtechnikmesse AGRITECHNICA in Hannover im November 2005 unternommen (**Bild 8**).

Durch das ATB werden gemeinsam mit den Industriepartnern weitere Schritte zur wirtschaftlichen Verwertung vorbereitet:

- Marktvorbereitende Maßnahmen durch Information und Präsentation auf Industriemessen,
- Vorbereitung eines Herstellungsverfahrens für das Messsystem in Losgrößen in der Größenordnung von 100 Stück,
- Preiskalkulation für das herzustellende Messsystem,
- Abstimmung der Distribution mit potenziellen Vertriebsunternehmen.

Vom Ergebnis dieser Schritte werden die Chancen für die wirtschaftliche Verwertung sehr stark abhängig sein. Gegebenenfalls wird auch eine Lizenzvergabe erwogen.

● Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Das im Ergebnis des Projekts entwickelte Muster des Datenerfassungs-Systems wird durch das ATB Potsdam-Bornim für Labor- und praxisnahe Untersuchungen von Verfahrenslinien zur Ernte von Kartoffeln und darüber hinaus von Nachernteverfahren für Obst eingesetzt und dabei auf Eignung im Vergleich zu bestehenden Dummy-Methoden getestet (**Bilder 9** und **10**).

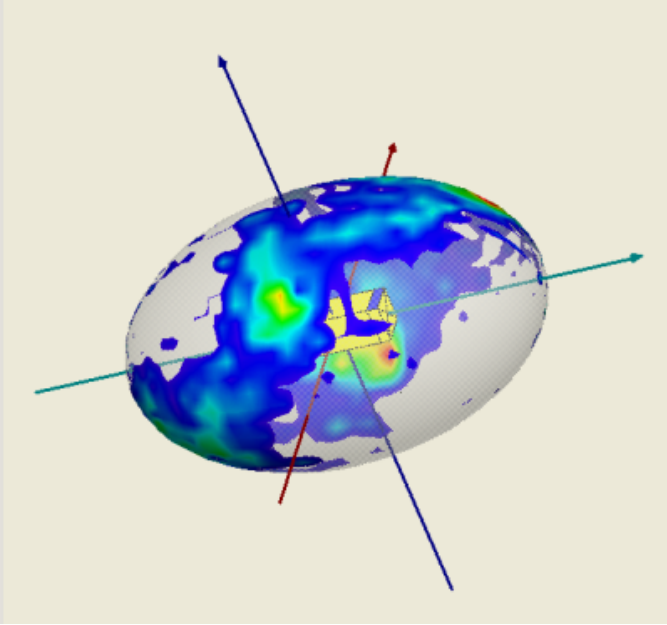


Bild 9: Veranschaulichung des Potenzials des implantierbaren Stoßsensors zur drei- dimensionalen Darstellung der Verteilung der gemessenen Stoßdaten an einer Modell-Kartoffel

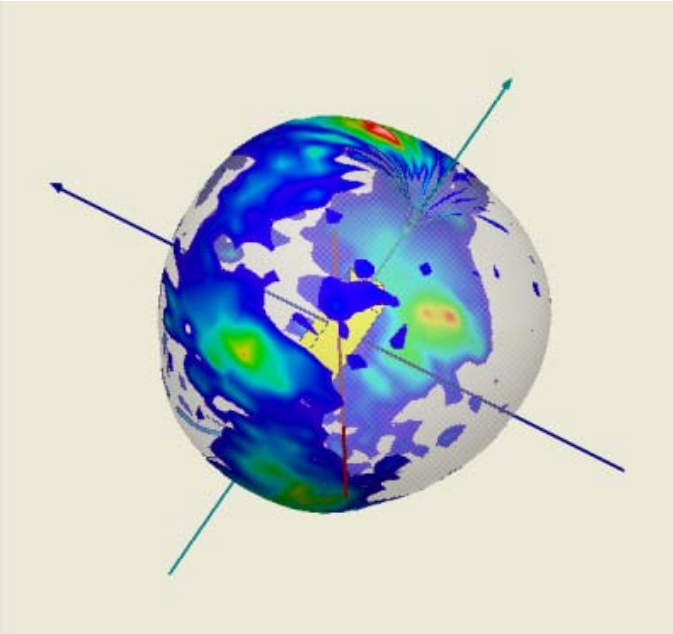


Bild 10: Veranschaulichung des Potenzials des implantierbaren Stoßsensors zur dreidimensionalen Darstellung der Verteilung der gemessenen Stoßdaten an einem Modell-Apfel

Diese Untersuchungen sollen auf die Entwicklung von Prognose-Modellen zur Beschreibung von Verderbnisrisiken ausgedehnt werden.

Grundsätzlich wird die entwickelte technische Lösung für die Zertifizierung von Produktionsverfahren und Logistikketten bei empfindlichen Gütern von Bedeutung sein. Durch Einsatz des neu entwickelten Systems verbessern sich die Voraussetzungen dafür, dass Messungen der mechanischen Belastung zur Zertifizierung von Produktionsverfahren für die Beurteilung des Beschädigungsrisikos von Kartoffeln, Obst und Gemüse angewendet werden. Hier stützt man sich bislang mangels geeigneter Methoden nur auf eine unzulängliche Einschätzung der produktschonenden Verfahrensgestaltung. Für die Produktion und den Großhandel beispielsweise von Kartoffeln wurden Kriterien zur Beurteilung mechanischer Belastungen zwar benannt, aber aus technischer Sicht nicht klar definiert (QS HANDBUCH KARTOFFELN, 2004). Zur Beurteilung der Eignung technischer Einrichtungen und Verfahren ist es notwendig, alle technischen Faktoren zu berücksichtigen, welche zur mechanischen Belastung beitragen. Dies ist zur Zeit nur mit Hilfe geeigneter elektronischer Messsysteme möglich.

- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse

Die Anwendung eines "Dummy" zur Beurteilung der mechanischen Belastung empfindlicher Produkte ist eine wissenschaftlich anerkannte Vorgehensweise. Die Aussagefähigkeit dieser Methode kann hinsichtlich der Beurteilung des Schadensrisikos in Verbindung mit dem Verwendungszweck wesentlich erhöht werden (XIN & BRUSEWITZ 1994, PANG *et al.*1994, HEROLD *et al.* 1998, HERPPICH *et al.* 2000, BIELZA *et al.* 2003, VAN

CANNEYT *et al.* 2004). Bei der Beurteilung des Beschädigungsrisikos spielt die Beschädigungsempfindlichkeit der Produkte eine wichtige Rolle. Durch die mit dem neu entwickelten System deutlich verbesserte Übertragbarkeit der Messdaten auf das reale Produkt ergeben sich hierfür verbesserte Voraussetzungen. Dadurch lässt sich gegenüber den bisher unbefriedigenden Lösungen eine weitgehende mechanische Identität erreichen.

Der Forschungsaufwand für vergleichende Bewertungen von Produktbelastung und Produktbeschädigung in Referenzversuchen und die Entwicklung zuverlässiger Prognosemodelle für verursachte Produktschäden ist jedoch beträchtlich. Die hiervon zu erwartenden Ergebnisse werden aber eine entscheidende Voraussetzung bilden, um ausreichende Akzeptanz für diese Prüfmethode zur Zertifizierung von Verfahren der Ernte, Aufbereitung und Vermarktung und Logistikketten zu schaffen. Die Entwicklung von innovativen Prognosemodellen für Produktqualität und -sicherheit sollte in einer nächsten Phase im Anschluss an dieses Vorhaben umgesetzt werden.

Ein spezifisches Anwendungsbeispiel in Deutschland ist das Verfahren Kartoffelproduktion. Bisher wurden hierfür über mehrere Jahre systematische Verfahrensanalysen mit Belastungsprüfkörpern durch die KTBL-Versuchsstation Dethlingen durchgeführt, mit der das ATB enge Kontakte pflegt. Nunmehr erfolgte in Abstimmung mit dem KTBL ein gemeinsamer Test, wobei das implantierbare System im Vergleich mit anderen Systemen bei der Kartoffelernte im Jahre 2005 eingesetzt wurde. Dabei wurden wertvolle Erfahrungen unter Praxisbedingungen gesammelt. Die Messdaten aus der Kartoffelernte sowie von weiteren Verfahrensabschnitten sollen letztlich für den Aufbau einer spezifischen Datenbank verwendet werden, mit dem Ziel einer verbesserten Beurteilung des Beschädigungsrisikos für Kartoffeln.

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die Arbeiten wurden erfolgsorientiert durchgeführt. Durch kritische Prüfung der Zwischenergebnisse wurde zum Abschluss des Vorhabens ein Ergebnis entsprechend der angestrebten Lösung erreicht.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Im ATB liegt ein komplettes Funktionsmuster vor, mit dessen Hilfe die Arbeitsweise des Systems demonstriert werden kann. Es wurde vereinbart, dass unmittelbar nach Abschluss des Vorhabens je ein komplettes Funktionsmuster für jeden der beteiligten Partner

bereitgestellt wird, welches zur Präsentation vor möglichen Nutzern zur Verfügung stehen soll.

6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Wie schon im Punkt I.3 erläutert, bereitete die Entwicklung einer zufrieden stellenden technischen Lösung für die drahtlose Telemetrie zur Übertragung der Stoßmessdaten erhebliche Probleme. Dadurch bedingt ergaben sich Verzögerungen gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan. Im Zusammenhang mit der Datenübertragung ergaben sich noch weitere Probleme hinsichtlich der Konzeption der Signalverarbeitung im Datensender, zu deren Lösung zusätzlicher Zeitaufwand erforderlich war.

Auf zweimaligen Antrag des Zuwendungsempfängers (Schreiben vom 05.09.2003 und 19.02.2004) wurde vom Zuwendungsgeber einer kostenneutralen Verlängerung zugestimmt (Schreiben PTJ vom 26.09.2003 und 02.03.2004). Das ursprünglich vorgegebene Ausgabenlimit für die Zuwendung wurde eingehalten. Die Bearbeitungszeit verlängerte sich insgesamt um 15 Monate bis zum 31.12.2004 und blieb damit im Rahmen des Gesamtvorhabens.

IV Zusammenfassung

In den Produktionsverfahren für empfindliche Agrarprodukte bestehen hohe Schadensrisiken. Die Schadensanalyse am Originalprodukt erlaubt nicht, zeitnah die eigentlichen Schadensursachen aufzudecken und zu lokalisieren. Um die Verfahren zu bewerten und zu optimieren, werden räumlich/zeitlich aufgelöste Informationen über die Quellen mechanischer Belastungen benötigt. Die Daten von bestehenden Messsystemen für die Belastung der Agrarprodukte sind wegen abweichender geometrischer und mechanischer Eigenschaften nicht ausreichend auf das reale Produkt übertragbar.

Deshalb wurde eine innovative technische Lösung zur Erfassung von triaxialen Stoßbeschleunigungsdaten durch ein telemetrisches Messsystem entwickelt. Dieses portable Messsystem besteht aus zwei Komponenten, einem autarken Datensender (mit Beschleunigungssensor) und einem Datenempfänger. Gegenüber dem Stand der Technik wurde eine deutliche Miniaturisierung zu relativ niedrigen Kosten erreicht, so dass der Datensender in ein reales Produkt implantiert und somit die Übertragbarkeit der erfassten Belastungsdaten gewährleistet werden kann.

Die Miniaturisierung des Datensenders wird hauptsächlich durch die Energiequelle begrenzt, welche etwa 50 % seiner Größe ausmacht. Für die Sensorelektronik genügte

SMD Technologie, um die angestrebte Baugröße zu realisieren. Der Datensender ist nach Größe und Masse (L x B x H: 42 mm x 13 mm x 13 mm, m: 15 g) kleiner als eine Mignon-Batterie (R6) und lässt sich wie vorgesehen in einen Apfel, eine Kartoffelknolle oder eine Möhre implantieren. Die Stoßbelastung wird also direkt am Originalprodukt beim Lauf durch Verfahrensketten der Ernte und Nachernte bestimmt.

Die triaxiale Beschleunigung des Produkts (Messbereich ± 200 G, 1 G = 9,81 m/s²) wird kontinuierlich erfasst (3000 Werte je Sekunde) und über eine zuverlässige Funkverbindung online zum Datenempfänger übertragen. Die Daten stehen für die Echtzeitüberwachung und weitere detaillierte Auswertungen zur Verfügung. Die Einsatzdauer des Datensenders beträgt mit einer Akkuladung mindestens fünf Stunden.

Das Messsystem liefert relevante Informationen, um kritische Stellen in den Verfahren zu detektieren. Damit wurde eine wichtige Voraussetzung geschaffen für ihre Optimierung und die Reduzierung von Verlusten und dadurch bedingten Umweltbelastungen.

V Detailbericht

1 Ergebnisse des Verbundprojekts

1.1 Zielspezifikation (Aussagen zu Anforderungen an Dimension, Robustheit, Einsatz- und Betriebsbedingungen, Leistungsfähigkeit, Messbereich und Genauigkeit)

Konzept und Ausführung des Messsystems orientieren sich an den vorgegebenen Zielparametern für das implantierbare Messsystem:

Geometrische und mechanische Parameter

maximale Abmessungen / mm	Länge Durchmesser	40 12
Dichte / g/cm^3		1
Messtechnische Parameter:		
Beschleunigungssensor:	Anzahl der Messachsen Messbereich / G (1 G = 9,81 m/s^2)	3 200
Signalverarbeitung:	Abtastrate / 1/s Messauflösung / Bit (Vektorsumme)	3000 8
Betriebsparameter:	Ununterbrochene Einsatzdauer / h Betriebstemperaturbereich / °C	6 +5 ... +35
weitere Eigenschaften:	wasserdicht, fruchtsäurebeständig	
Datenverarbeitung:		
Plattform	PC (Notebook)	
Datendarstellung	Beschleunigungs-Zeit-Grafik (online und offline)	
Datenexport als ASCII-Tabelle	mehrspaltige Darstellung: Zeit, Beschleunigung, Zeitmarken	

1.2 Entwicklung der Baugruppen (Materialauswahl, Testschaltungen und –aufbauten, Technologieentwicklung, Zuverlässigkeitstests)

1.2.1 Signalgewinnung, Codierung (A/D-Wandlung)

Als geeigneter Sensor zur dreidimensionalen Erfassung der Beschleunigung wurde der Typ ACH-04-08-05 der Firma Measurements Specialities, Inc. (MSI) gefunden (**Bild 11**).

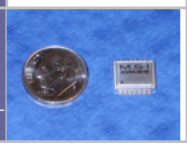
Model	Product Photo	Package/ Housing	Technology	Unique Feature	Bandwidth	Output	Range (gs)	Accuracy	Operating Temp Range (°C)	Applications
ACH-04-08-05		plastic, solder mounting	Piezoelectric film	Multi-axis, each as independent channel	0.5 Hz to 5 kHz	low impedance, buffered output	+/-250	Linearity +/- 0.1%	-40° to 85°	disk drive shock sensor, automotive, appliances, security sensors

Bild 11: Technische Daten des verwendeten Beschleunigungssensors

Bei Außenabmessungen von 11,5 x 10,9 x 1,7 mm wandelt der Sensor mit 3 V Betriebsspannung Beschleunigungen im Bereich ± 250 G (1 G = Erdbeschleunigung 9,81 m/s^2) in drei Achsen in analoge Spannungen um. Entsprechend der ersten Konzeption werden die drei analogen Signale nach passiver Pegelanpassung einem 10 Bit-A/D-Wandler zugeführt. Dessen Ausgangssignal wird - auf 8 signifikante Datenbits (ohne Vorzeichen) reduziert - im angeschlossenen Mikrocontroller quadriert und über alle 3 Kanäle aufaddiert. Im Ergebnis liegt eine 16 Bit Zahl vor, die die Quadratesumme der Messwerte aller drei Kanäle repräsentiert. Diese 16 Bit Zahl wird telemetrisch übertragen und im PC weiterverarbeitet. Diese Konzeption wurde später erheblich erweitert.

1.2.2 Technologie der Datenerfassung/-speicherung

Zu Beginn der Bearbeitung des Projektes war die Frage zu klären, ob die Speicherung der Messdaten im zu implantierenden Baustein erfolgen sollte (Datenlogger) mit nachfolgendem Auslesen in einen PC oder ob die Daten fortlaufend per Funk an einen entfernt stehenden PC zu übertragen seien (**Bild 12**).

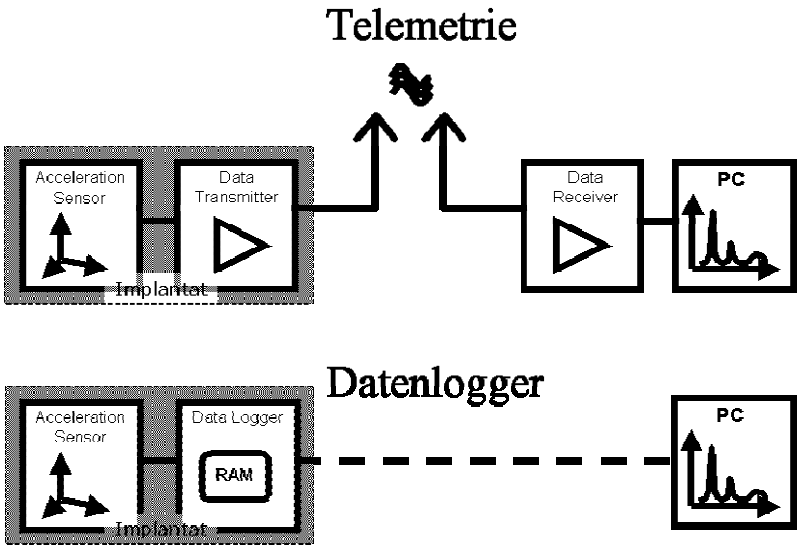


Bild 12: Funk oder Logger?

	Drahtlos (Funk)	**Datenlogger**
Vorteile	⇨ Kaum Intelligenz im Implantat (flexible Datenvorverarbeitung im PC vor Speicherung möglich) ⇨ Onlineverfügbarkeit der Daten ⇨ keine Beschränkung bezüglich Speicherkapazität ⇨ evtl. leichteres Wiederfinden , wenn im Produktstrom verschüttet	⇨ Geschwindigkeit und Kanalzahl kaum begrenzt ⇨ es werden wenig unnötige Daten gespeichert, da Vorverarbeitung im Implantat wegen RAM-Größe nötig ⇨ (nahezu) beliebig viele Implantate gleichzeitig einsetzbar ⇨ unabhängig von Funkstörungen/-problemen ⇨ preisgünstig
Nachteile	⇨ Geschwindigkeit und Kanalzahl durch Übertragungsrate begrenzt ⇨ Anzahl gleichzeitig messender Implantate nur mit großem Aufwand über eins zu bringen (ein Empfänger je System nötig) ⇨ Abhängigkeit von Funkstörungen/-problemen ⇨ weniger preisgünstig wegen Empfängeraufwand	⇨ Intelligenz des aufzeichnenden Systems im ROM eingebrannt - außer bei bootbarem System ⇨ Daten nur offline verfügbar ⇨ Implantat muss zum Auslesen der Daten der Frucht entnommen werden, sofern Datenauslesen drahtgebunden oder per Infrarot erfolgt ⇨ Speicherkapazität durch eingebauten RAM begrenzt ⇨ Wiederfinden eventuell schwierig, wenn im Produktstrom verschüttet

Für die Entscheidungsfindung war vorgesehen, die Eignung der Funklösung zu überprüfen und bei Nichteignung eine Variante in Form eines Datenloggers zu realisieren.

Bild 13 zeigt den Versuchsaufbau für die prinzipiellen Vorversuche zur funktechnischen Übertragung aus einer Frucht.

Er bestand aus einem mit 100 kHz Signal modulierten 433 MHz Sender (1) mit ca. 1 mW Ausgangsleistung sowie einem mit einer passenden Antenne bestückten Implantat (2), das mittels Koaxialkabel an den Sender angekoppelt war und sich in einer Kartoffel befand. Ein Empfänger (6) mit Richtantennen (7) und einem Zähler (5) zum Nachweis des Signals befand sich in ca. 2 m Entfernung. Sender und Implantat bewegten sich auf einem teilweise geschirmten (3) Förderband (4) einer Sortieranlage.

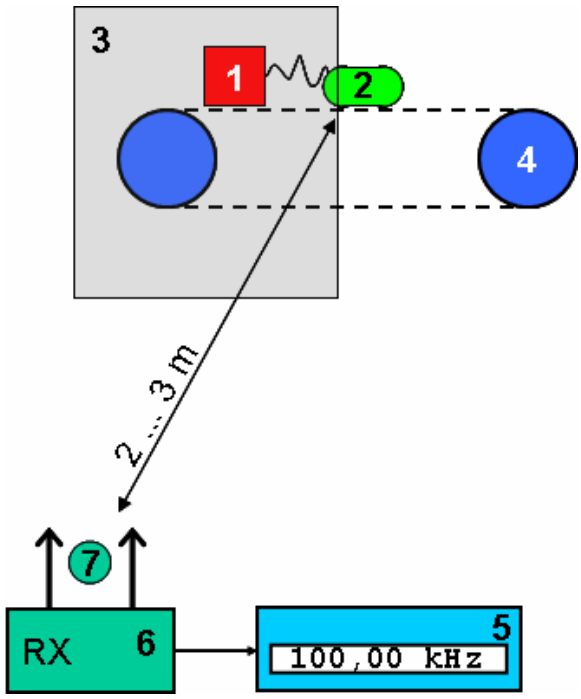


Bild 13: schematischer Versuchsaufbau für Vorversuche

Zur Entscheidungsfindung waren folgende Parameter zu untersuchen:

- Zuverlässigkeit der Datenübertragung/-aufzeichnung (auch bei schneller Bewegung in metallisch umhüllender Sortieranlage)
- Erfüllung der Geschwindigkeitsanforderungen (mindestens 3000 Messungen der Beschleunigung je Sekunde)
- niedriger Stromverbrauch (ca. 1 Arbeitstag Betriebsdauer bei intermittierendem Betrieb)
- Robustheit gegen – bezogen auf den zukünftigen Einsatzort (z.B. Sortieranlagen) - übliche elektromagnetische Strahlung
- bei funktechnischer Übertragung: Nutzung eines für den Nutzer anmelde- und gebührenfreien Frequenzbandes

Die ersten Versuche der Übertragung von modulierten Signalen bei 433 MHz zeigten mehrere Probleme bezüglich der Funkübertragung und der Verifizierbarkeit der Funklösung:

- es zeigte sich, dass es zur Beurteilung der Übertragungszuverlässigkeit unerlässlich ist, einen Sender in den finalen Dimensionen zu erstellen; beim Versuch nur die Antenne in der geplanten Dimension auszuführen und in eine Frucht zu implantieren, während der Sender per Kabel extern angekoppelt ist, zeigten sich starke Einflüsse des Kabels für den Antennenanschluss, die letztlich eine Beurteilung der Eignung der Antenne unmöglich machten
- weiterhin zeigte sich, dass reflexionsbedingt bei Bewegung des Senders partielle Auslöschungen des Signals am Empfangsort auftreten; daraus resultiert die Notwendigkeit des Einsatzes zweier vollständig getrennter Empfänger und Antennen, deren Ausgangssignale im Sinne eines Diversity-Empfangssystems zusammengeschaltet werden müssen

Diese Erkenntnisse machten deutlich, dass der Aufwand, allein die Eignung der Funkübertragung zu beurteilen, erheblich größer werden würde, als zunächst angenommen und somit einen nicht unerheblichen Teil der Bearbeitungszeit in Anspruch nehmen würde. Außerdem würde der Aufwand zur Realisierung des Empfangssystems die ursprünglichen Vorstellungen deutlich übertreffen. Trotzdem wurde die Untersuchung weitergeführt, insbesondere auch, weil die für eine alternative Lösung auf Basis eines Datenloggers für die gewählte Baugröße benötigten Bauelemente nicht ohne weiteres beschaffbar waren.

Der nächste Schritt zur Überprüfung der Eignung einer funktechnischen Übertragung bestand darin, einen vollständigen Sender in den geplanten Dimensionen zu realisieren. Dieser sollte zunächst zur Beurteilung der Übertragungsqualität mit einem bekannten definierten Digitalsignal moduliert sein. In Anlehnung an die geplante Übertragung eines 16 Bit Signals, das die Quadratsumme der drei mit 8 Datenbits codierten Kanalinformation repräsentiert, wurde mittels Mikrocontroller ein determiniertes 16 Bit Signal erzeugt. Das Implantat wurde in eine Frucht (Apfel/Kartoffel) eingeführt und in einer teilweise geschirmten Trommel schnell bewegt. Bis zu 6 m entfernt befanden sich zwei identische Empfänger jeweils mit eigener Antenne, um ein Diversity-Empfangssystem zu simulieren. Die Ausgangssignale beider Empfänger wurden mit einem schnellen Mehrkanaloszilloskop (Yokogawa Typ DL750) mit eingebauter Festplatte zur späteren Auswertung aufgezeichnet. Für diesen Versuch erfolgte die Aussendung der 16 gültigen Datenbits zweimal hintereinander pro Zeitschritt. Somit lag in der Aufzeichnung jedes Datenwort viermal vor (zweimal hintereinander gesendet, mit zwei Empfängern empfangen).

Mit einer eigens entwickelten Software gelang der Nachweis, dass nur sehr wenige Datenworte nicht in mindestens einem der vier aufgezeichneten Pakete enthalten waren.

In 155.435 Datensätzen konnten insgesamt 202 Datensätze nicht gefunden werden.

Die sich daraus ergebende Fehlerrate von 13 x 10^{-4} hat jedoch nur theoretischen Charakter, da bis dahin noch keine praktische Methode existierte, auf das ausgesendete Signal sicher zu synchronisieren und letztlich zu entscheiden, in welchem der vier Datenworte die richtige Information steckte.

Unter Vorbehalt wurde nun entschieden, die Funklösung tatsächlich vollständig zu realisieren. Auf Basis dieser Entscheidung und der bisherigen Ergebnisse wurde ein vollständig funktionsfähiges Implantat aufgebaut - mit provisorischem (noch nicht wasserdichtem) Gehäuse - und wechselbaren Primärelementen zur Stromversorgung.

Der Aufbau bestand nun aus einem Elektronikblock aus drei miteinander verbundenen Leiterplatten. Eine Platine enthielt den Beschleunigungssensor mit passiver Außenbeschaltung sowie einen Hallsensor zum magnetfeldgesteuerten Ein- und Ausschalten des Implantats, eine weitere Platine enthielt den Mikroprozessor mit dem A/D-Wandler und eine dritte Platine enthielt den Sendeschaltkreis und einen speziell dazu entwickelten Leistungsverstärker, der die Leistung um ca. 10 dB auf etwa 10 mW erhöhen sollte. Die Stromaufnahme dieser Baugruppe betrug ca. 12 mA bei 3 V.

Beim einem zweiten Implantat wurde statt der Beschleunigungsdaten ein bekanntes periodisches Signal gesendet, um unbeeinflusst von den Eigenschaften der analogen Signalgewinnung die Funkstrecke beurteilen zu können.

1.2.3 Der reale Empfänger

Als größtes Problem erwies sich - erwartungsgemäß - der korrekte Empfang der ausgesendeten Datensignale. Zwar hatten die Zuverlässigkeitstests nachgewiesen, dass die Information in den Empfangskanälen vorhanden war, aber da waren auch ausreichend viele Störsignale und es galt diese zuverlässig von den Nutzsignalen zu unterscheiden.

Bild 14 zeigt das Signalschema der Aussendungen des ersten vollständig aufgebauten Implantats.

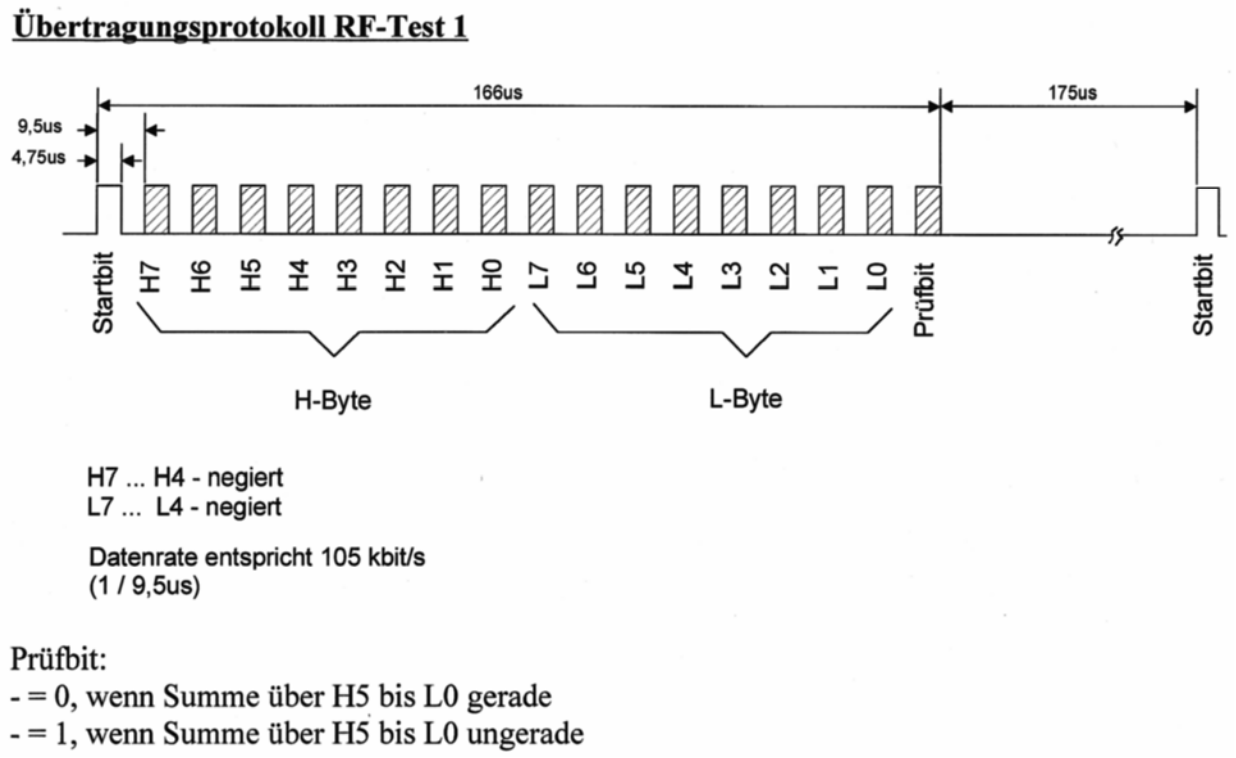


Bild 14: Signalschema des Implantats mit 16 Datenbits und einem Prüfbit

Es wurde im ASK - Mode gesendet, d.h., der Sender sendet zum vorgesehenen Zeitpunkt einen Impuls (4,7 µs langen Hochfrequenzburst) für eine logische Eins und sonst keinen. Damit die Empfängerregelung bei - häufig vorkommenden - Übertragungen des Wertes 0 nicht aufregelt und Rauschen detektiert, wurde jede zweite Vierer-Gruppe Bits (Nibble) invertiert.

In der ersten Version einer Empfangseinheit wurden die binarisierten Ausgangssignale der Hochfrequenzempfänger einem Mikrocontroller zur Synchronisation und Datenrückgewinnung zugeführt, welcher die rekonstruierten Daten über eine serielle Schnittstelle an einen PC weitergab. Das Ergebnis war in Bezug auf die Fehlerhäufigkeit sehr unbefriedigend (Fehlerhäufigkeit günstigstenfalls 1 %). Dafür gab es mehrere Ursachen: Zum einen unterschied sich die Synchroninformation, die aus einer Pause, einem Startbit und einem Stoppbit bestand, nicht ausreichend signifikant vom Nutzsignal. Zum anderen war die Erkennung logisch Eins oder Null insofern unsicher, als nur die Eins gesendet wurde, während die Null durch fehlendes Signal erkannt werden sollte. Insbesondere während der längeren Pause oder wenn mehrere Nullen hintereinander zu übertragen waren, führten Störungen im Empfangskanal zu Fehlinterpretation. Weiterhin schwankt empfangsprinzipbedingt die Breite der empfangenen Datenimpulse, was den genauen Beginn des nächsten erwarteten Bits für den Mikrocontroller schwer vorhersehbar macht. Eine sichere Synchronisation konnte selbst bei wenig gestörter Umgebung nicht erreicht werden.

Es wurde nun ein verändertes Signalschema verwendet, um eine sich eindeutig von den Datenbits unterscheidende Synchroninformation zu erhalten (**Bild 15**).

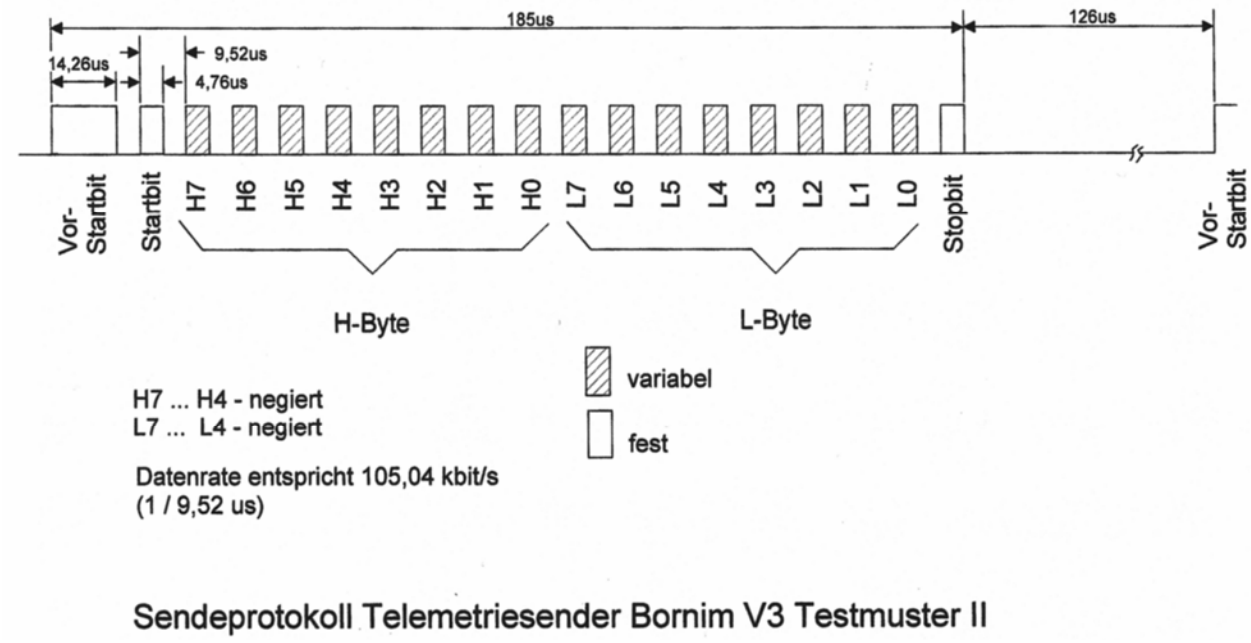


Bild 15: Signalschema mit verbesserter Synchroninformation (das Stoppbit entfiel später)

analog-digitale PLL - neue Empfängerkonzeption

Gleichzeitig mit der Veränderung des Signalschemas begannen Arbeiten zur Entwicklung einer Hardware-PLL (PLL ... Phase Locked Loop ... Phasen-Regel-Schleife), die eine Synchronisation auch bei gestörtem Empfangssignal ermöglichen sollte und inzwischen unter anderem zu einer Patentanmeldung (PATENTSCHRIFT: 2005) führte.

In diesem Zusammenhang entstand nun eine geschlossene Empfängerkonzeption unter Einbeziehung der Realisierung des Diversity-Empfangs.

Diversity

Die realisierte Version enthält nun zwei Mikrocontroller, einen ersten als integrierter Bestandteil der PLL und einen zweiten, der nun neben der Kommunikation mit dem PC und der Ansteuerung einiger Statusanzeigen die Diversity-Funktion realisiert. Er entscheidet, welches der beiden an seinen Eingängen anliegende Datensignal gültig ist und welches nicht. Dazu wird der Datenstrom nicht nur zum erwarteten Zeitpunkt eines Datenbits sondern auch genau zwischen zwei Datenbits abgetastet, um zu ermitteln, ob die Pause zwischen zwei Bits ungestört (= Null) war.

Durch die Berücksichtigung der Qualität der Pauseninformation und die speziell entwickelte Art der Zusammenführung beider Empfangskanäle konnten zum ersten Mal akzeptable Ergebnisse erzielt werden, was die Zahl der Übertragungsfehler angeht. Parallel entwickelte Routinen zur Identifikation und Korrektur einzelner Datenfehler im PC-Programm verbesserten die Übertragungssicherheit weiter. Anlässlich einer Versuchsreihe in einer Kartoffelabpackanlage in Wittbrietzen bei Potsdam (**Bild 16**) im Oktober 2003 konnte schließlich eine akzeptable Übertragungssicherheit unter realistischen Bedingungen (schnelle Bewegung in zum Teil metallisch geschirmter Umgebung) nachgewiesen werden. Es wurde eine Fehlerrate unter 10^{-3} erreicht.

Bild 16: Implantat in Kartoffel (mit rotem Kunststoffband umklebt) in Abpackanlage

1.2.4 Keramikresonator (Typ: PBRC-4,19AR)

Der Takt des Mikrocontrollers im Implantat, der die Sendedaten erzeugt, wird aus einem Keramikresonator erzeugt. Ein - wesentlich stabilerer - Quarz konnte leider nicht eingesetzt werden, da in der benötigten kleinen Baugröße kein solches Bauelement beschaffbar war. Dieser Keramikresonator hat die unangenehme Eigenschaft, seine Frequenz mit der Temperatur zu verändern, was einen erheblichen (zeitlichen) Aufwand bei der Entwicklung der PLL auf der Empfängerseite zur Folge hatte (**Bild 17**).

Spezifikation (PBRC- 4,19AR)

Frequenz Toleranz ±0.5 %

Resonanz Impedanz 30 Ω Max

Temperatur Charakteristik

(-20 to +80 °C) ± 0.3 %

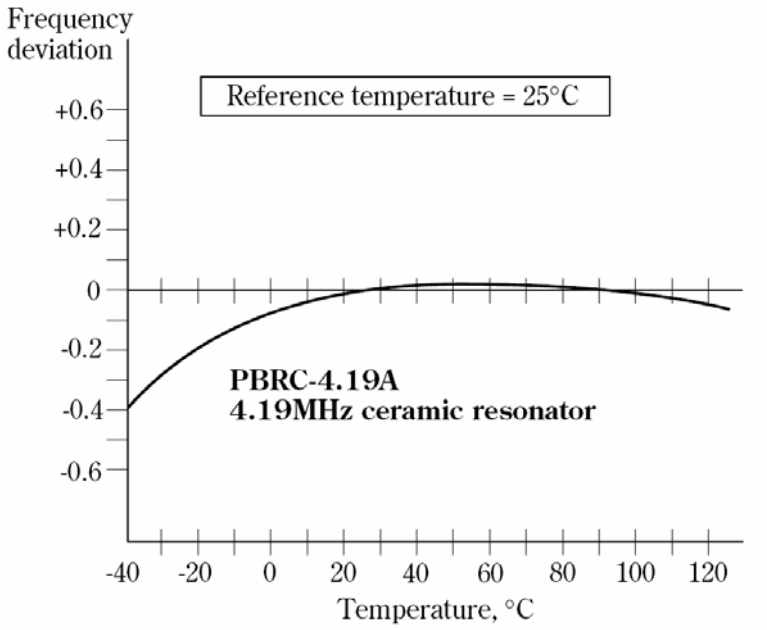


Bild 17: Temperaturcharakteristik des Keramikresonators

Da die PLL auch bei längerem Ausfall der Synchroninformation (bis zu einer Sekunde) phasenstarr mit dem Datensignal verkoppelt bleiben sollte, durfte der Fangbereich derselben nicht zu groß gewählt werden. Damit wäre die PLL aber nicht in der Lage gewesen, den Frequenzänderungen des Keramikresonators zu folgen. Eine Kombination zusätzlicher Hardware- und Softwarekomponenten (im 1. Mikrocontroller) löste schließlich das Problem.

1.2.5 Beschleunigungssensor - Analogschaltung

Parallel zu den Arbeiten an der Übertragung zwischen Implantat und PC wurden mit dem ersten verfügbaren Implantat, das einen Beschleunigungssensor besaß, Untersuchungen zu Empfindlichkeit, Rauschen und Stabilität durchgeführt.

Schon bei ersten Messungen fiel auf, dass die Nulllinie nicht unbedingt stabil war und insbesondere beim Anfassen des Implantats mit der Hand Schwankungen auftraten. Ursachen waren zum einen die passive und damit hochohmige Ankopplung des Sensors an die A/D-Wandlereingänge. Zum anderen stellte sich bei näherer Untersuchung des verwendeten Beschleunigungssensors heraus, dass dieser offensichtlich stark auf Lichteinfall an den Gehäuseseiten reagierte, ein Umstand, der selbst dem Hersteller bis dahin unbekannt war (laut Aussage des Herstellers wird inzwischen daran gearbeitet, das Problem durch Modifikation des Gehäuses zu beheben). In den folgenden Implantaten wurde der Sensorschaltkreis nachträglich mit zusätzlich auf die Gehäuseseiten aufgebrachtem Lack (Typ siehe Anhang) vor Lichteinfall geschützt.

Wegen der Quadrierung und damit Gleichrichtung der A/D-gewandelten Sensorsignale im Implantat, wurde auch das eingangsseitige Rauschen gleichgerichtet, was PC-seitig zu einem zusätzlichen, rauschbedingten Offset von 10 (bei einer Skale bis 256 / 8 Bit) führte.

So wurde beschlossen, trotz ohnehin beengter Platzverhältnisse auf den Platinen des Implantats eine aktive Schaltung zur Ankopplung des Sensors an die A/D-Wandler-Eingänge unter Nutzung von Operationsverstärkern zu realisieren. Neben der Möglichkeit, mit geringerer Eingangsimpedanz und zusätzlicher Bandbreitenbegrenzung das Rauschen zu verringern, konnte durch die nun mögliche Verstärkung der Pegel soweit erhöht werden, dass die A/D-Wandler bis an ihre maximale Eingangsspannung ausgesteuert werden können, wodurch sich das Signal-/Rauschverhältnis weiter verbesserte. Im Ergebnis liegt der rauschbedingte Offset bei der letzten realisierten Version zwischen 1 und 2 (bei einer Skale bis 256 / 8 Bit). Es ist keine nennenswerte Handempfindlichkeit mehr feststellbar.

1.2.6 Sensorabgleich - 3-kanalige Übertragung

Der Hersteller des Beschleunigungssensors gibt für die drei Kanäle des Sensors unterschiedliche typische Empfindlichkeiten an:

M_x = 1,80 mV / G (min. 1,07)

M_y = 1,80 mV / G (min. 1,07)

M_z = 1,35 mV / G (min. 1,07)

Dass die minimal garantierte Empfindlichkeit rund 40 % unter der typisch angegebenen liegt, deutet auf größere Toleranzen der Sensoren hin, über die der Hersteller im übrigen keine Angaben macht. Bereits das erste realisierte Implantat mit Quadrierung und Addition der digitalisierten Beschleunigungsdaten im Controller des Senders zeigte deutlich unterschiedliche Empfindlichkeit bei Belastung aus verschiedener Richtung. Hier kam ein wesentliches Problem der Vektoraddition bereits im Implantat zutage. Eine Korrektur der unterschiedlichen Empfindlichkeiten der drei Sensorachsen ist im Nachhinein nicht mehr möglich. Da inzwischen klar war, dass ein Vergießen der Hardware wegen der notwendigen Stabilität und Dichtigkeit unumgänglich sein würde, schied auch ein Hardwareabgleich aus.

Es wurde schließlich beschlossen, eine Lösung zu finden, bei der die Daten aller drei Messkanäle zum PC übertragen werden, so dass dort vor der Vektoraddition eine eventuell notwendige Korrektur der unterschiedlichen Empfindlichkeiten der drei Achsen möglich ist. Nebenbei wird das System durch die Tatsache aufgewertet, dass die volle 3D - Information zur Verfügung steht, die nun auch die Auswertung der Richtungsinformation möglich macht und damit Bereiche bevorzugter Belastung an untersuchten Objekten zu detektieren hilft.

Problem: die Datenmenge

Bisher waren 16 Datenbits übertragen worden (entsprechend der Summe dreier quadrierter 8-Bit-Werte). Zur Datenübertragung eines Messwertes stehen bei 3000 Messungen je Sekunde 333 µs - konkret wegen Rundung auf Vielfache der Prozessortaktzeit nur etwa 311 µs zur Verfügung inklusive Aussenden geeigneter Synchroninformation. Werden nun dreimal acht Datenbits plus dreimal ein Vorzeichenbit übertragen, so sind insgesamt 27 Bits zu übertragen. Die Übertragung eines Bit dauert ca. 9,5 µs (inklusive Pause), so dass die reine Datenübertragung 256,5 µs benötigt. Das Vorstartbit mit 14,2 µs zuzüglich des Startbits mit Pause 9,5 µs verbrauchen zusammen nochmals 23,7 µs. Insgesamt werden also 280,2 µs für Daten- und Synchronbits benötigt, für die notwendige Pause stehen bestenfalls 30,8 µs (entsprechend etwa 3 Bits) zur Verfügung, was zu wenig ist. Die hohe Wahrscheinlichkeit, dass auch drei aufeinander folgende Datenbits den Wert 0 haben, macht die Pause schwer unterscheidbar vom Datensignal. Würden statt der 8 nur jeweils 6 Datenbits übertragen, so ergäbe sich eine Einsparung von 57 µs und die zur Synchronisation genutzte Pause wäre 87,8 µs lang (entsprechend etwa 8 Bits) und damit ausreichend gut vom Datensignal zu unterscheiden.

Datenreduktion

Es wurde eine Methode zur Datenreduktion entwickelt und realisiert, die die Tatsache berücksichtigt, dass der relative (Bit-) Fehler eines beliebigen (digitalisierten, ganzzahlig vorliegenden) Messwertes zu höheren Messwerten kontinuierlich abnimmt. Ein mit 8 Bit digitalisierter Wert von 200 ist mit einem Bitfehler von $\pm$ 0,5 % (=1/200) bestimmt. Ein Wert von 20 jedoch mit $\pm$ 5 % (=1/20). Nimmt man (auch bei großen Messwerten) einen Fehler von $\pm$ 2,5 % (=1/40) in Kauf, einen Fehler, der bei linearen Systemen unter einem ganzzahligen Messwert von 40 ohnehin auftritt, so kann die Übertragung der 8-Bit-Zahlen mit nur 6 Bit erfolgen, sofern die digitalisierten Daten auf der Senderseite logarithmiert und auf der Empfängerseite wieder delogarithmiert werden. **Bild 18** zeigt die optimierte Übertragungsfunktion, **Bild 19** zeigt Original- und übertragene lineare Funktion, sowie zu den erwartenden relativen Fehler.

Zur Realisierung einer akzeptablen Arbeitsgeschwindigkeit werden Logarithmierung und Delogarithmierung in Sender und Empfänger jeweils über Tabellen realisiert, die senderseitig 256 und empfängerseitig 64 Einträge besitzen.

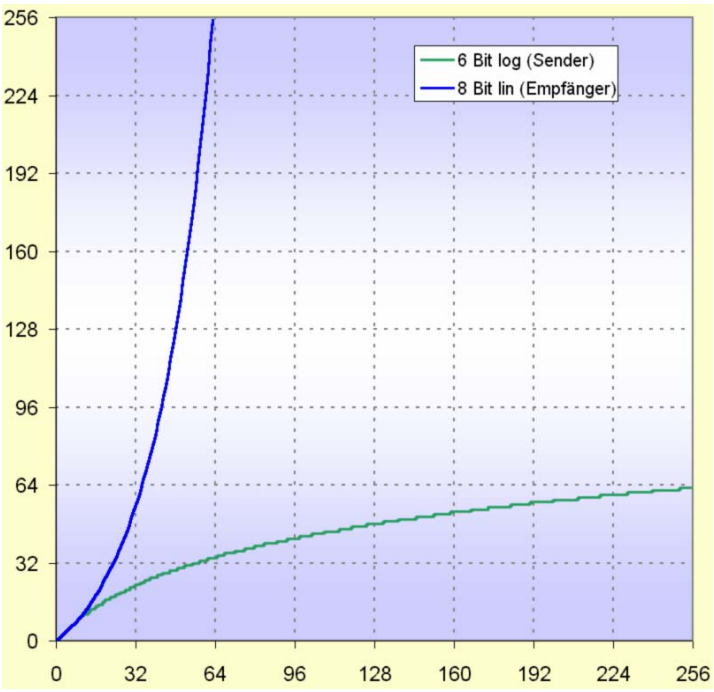


Bild 18: Übertragungsfunktionen für Sender und Empfänger

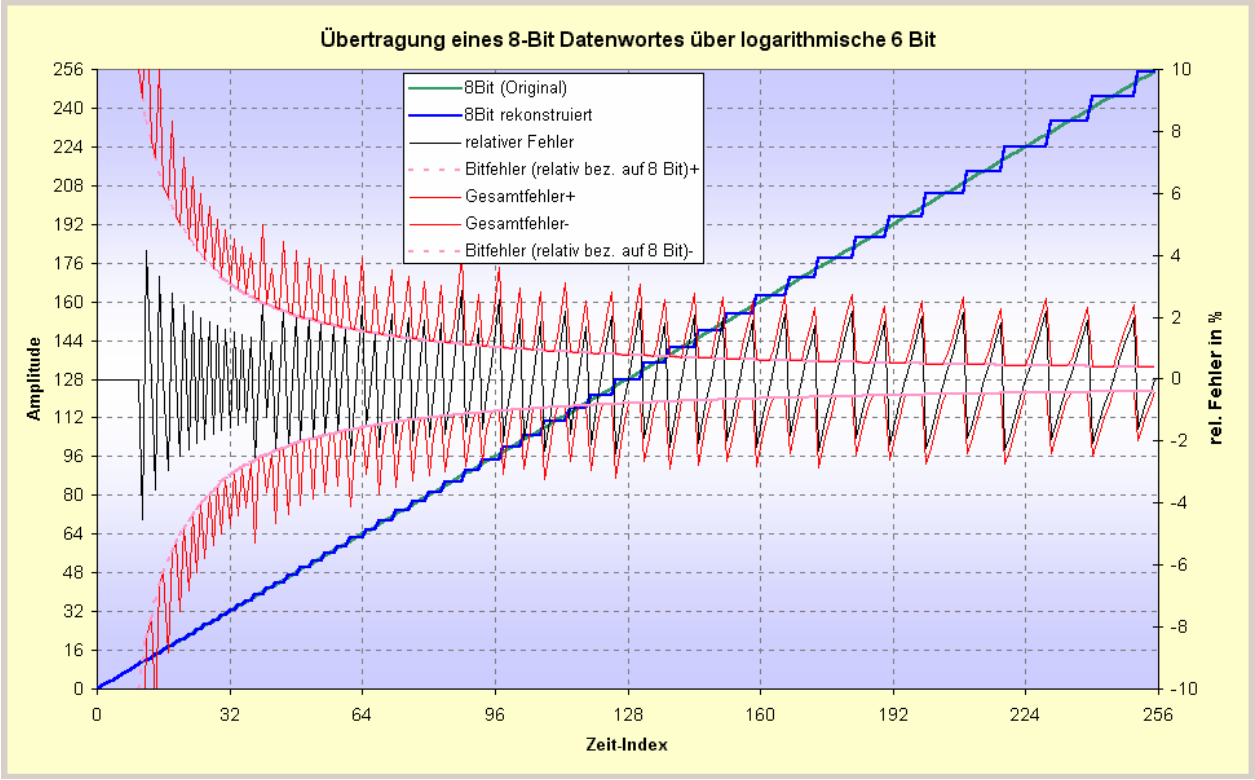


Bild 19: Darstellung des relativen Fehlers bei Reduktion von 8 auf 6 Bit

Zur Realisierung des eben beschriebenen Datenprotokolls wurde das in **Bild 20** dargestellte Signalschema realisiert.

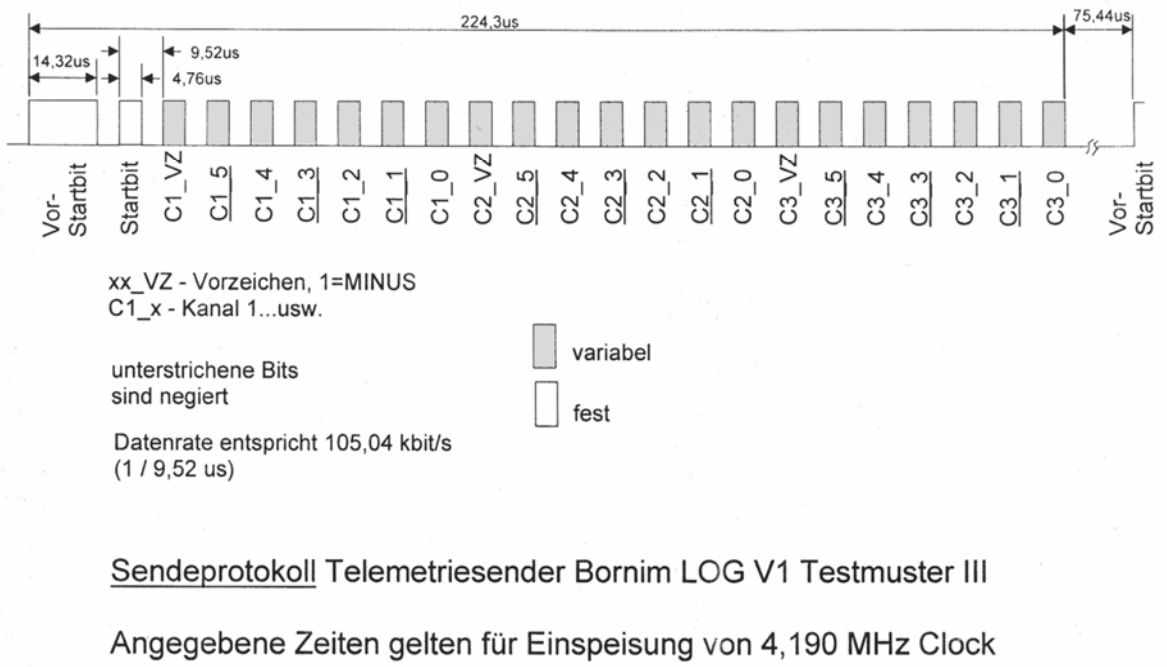


Bild 20: Signalschema für dreikanalige Übertragung 3 x (1 Vorzeichenbit + 6 Datenbit)

1.2.7 Stromversorgung des Implantats

Als Stromquelle diente bei den ersten Versuchen eine 3V Lithium-Primärzelle CR 1/3 N. Leider zeigte sich, dass dieser Batterietyp eine ungünstige Entladecharakteristik hatte, so dass nur ein geringer Teil der Kapazität nutzbar war, bevor die Klemmenspannung unter 2,7 V lag und somit die Funktion der Schaltung nicht mehr gewährleistet war. Daher wurde für die weiteren Versuche eine Reihenschaltung aus 3 Alkaline-Zellen (LR44) zu je 1,5 V, wie sie auch für Hörgeräte verwendet werden, genutzt. Ein Low-Drop-Spannungsregler stabilisiert und begrenzt die Betriebsspannung auf 3V. Überlegungen zur Gehäusegestaltung hatten mit Rücksicht auf die geforderte Robustheit, Dichtigkeit und Antennenanordnung schließlich das Eingießen des gesamten Implantats als Ergebnis, was die Nutzung von - nicht wechselbaren - Akkus nahelegt. Als geeigneter Typ erwies sich die NiMH-Knopfzelle V60HR (Varta-Typ 55906) von Varta, die vom Batterie Center, Bernd Joachim Sack KG - Berlin, zu einem axial angeordneten Dreierpack konfektioniert werden (**Bild 21**).

Bild 21: konfektioniertes Akkupack

Bild 22 zeigt die messtechnisch ermittelte Entladecharakteristik eines 3-Zellen-Akkupacks aus V60HR. Bei einem Stromverbrauch von 9 mA, wie er bei der letzten realisierten Implantatversion erreicht wurde, kann mit einer ununterbrochenen Betriebsdauer von mehr als 5 Stunden gerechnet werden.

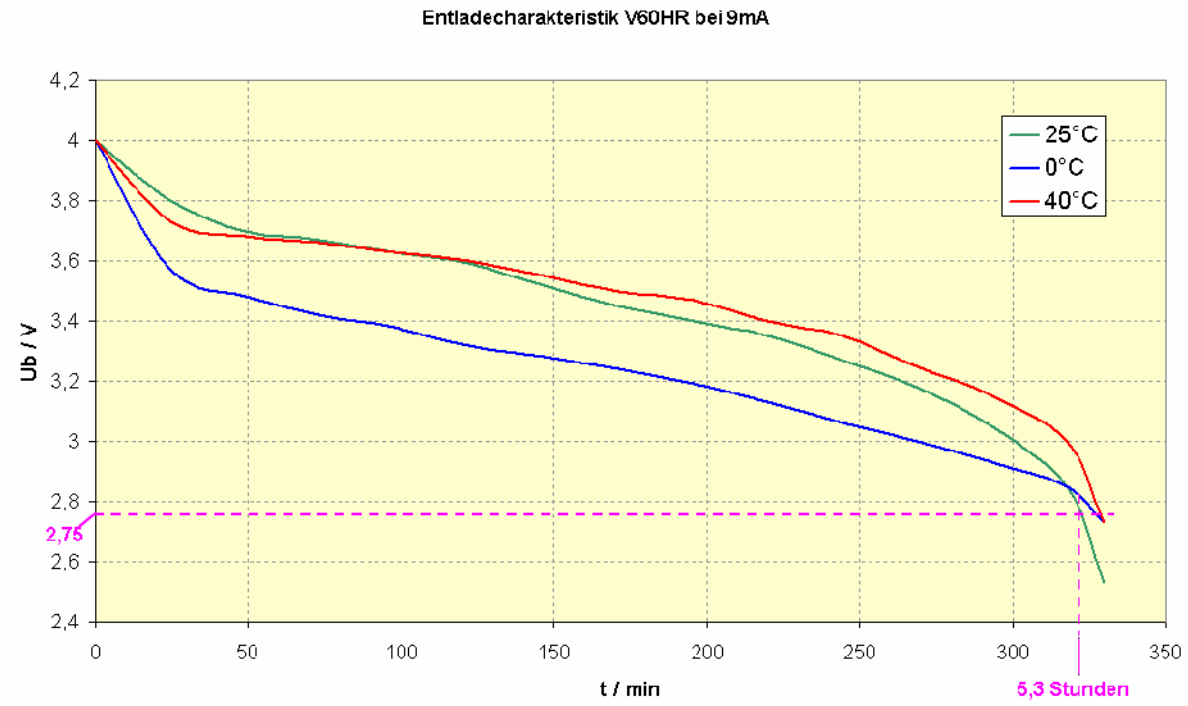


Bild 22: Entladekurve V60HR

Zum Aufladen des Akkus wurde ein spezielles Ladegerät entwickelt, das die spezielle Art der Anschaltung des Akkus über eine Schottky-Diode und zwei Hochfrequenzdrosseln berücksichtigt, sowie die Ladecharakteristik der Knopfzellen. Hierfür konnte weder ein fertiges Ladegerät verwendet werden noch schien einer der vielen am Markt vorhandenen Ladeprozessoren optimal geeignet. Das Ladegerät verfügt über einen Mikrocontroller mit integriertem A/D-Wandler und D/A-Wandler. Dies ermöglicht die Anzeige von Ladespannung, Ladezyklus und zu erwartender Kapazität über ein hintergrundbeleuchtetes LCD-

Display. Das Ladegerät arbeitet vollautomatisch, benötigt keine Bedienung und zeigt auch Fehler wie Kurzschluss oder hochohmigen Akku an. Die Ähnlichkeit der äußeren Abmessungen des Implantats mit denen einer Standard-R6-Zelle lässt die Nutzung einer handelsüblichen universellen Ladeschale (**Bild 23**) mit einer gefederten Elektrode zu.

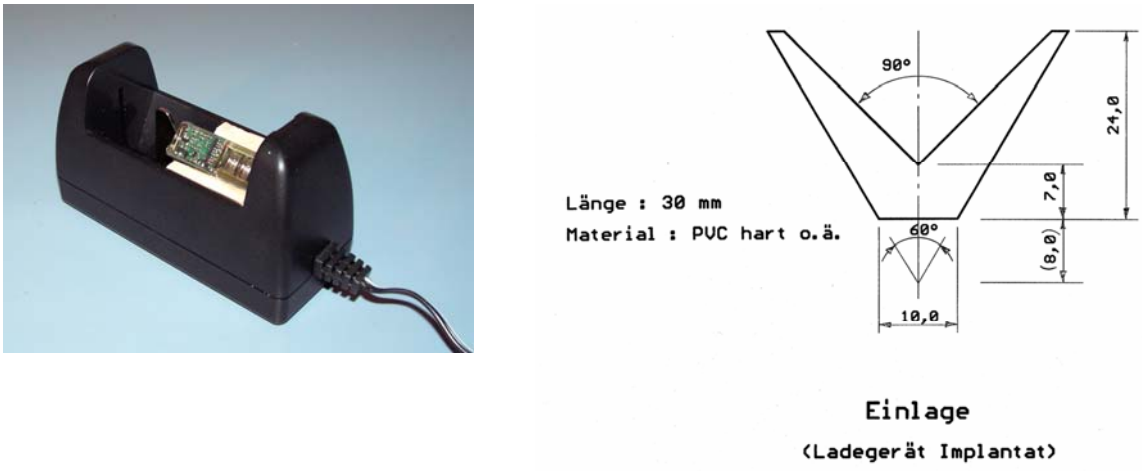


Bild 23: Ladeschale (Fa. Ansmann) und zusätzliche Einlage zur Fixierung des Implantats

Versorgt wird das Ladegerät wahlweise mit einem Steckernetzteil oder einer beliebigen Gleichspannung zwischen 10,5 V und 20 V (z.B. Autoakku).

1.3 Aufbau- und Montagetechnik für die Teilsysteme

1.3.1 Implantat

1.3.1.1 Elektronikblock

Das Implantat besteht aus einem Elektronikblock, dem Akkupack und der Antenne.

Der Elektronikblock seinerseits ist aus drei miteinander durch Verbindungsdrähte verbundene Leiterplatten aufgebaut (**Bild 24**). Eine Platine enthält den Beschleunigungssensor auf ihrer Innenseite sowie auf der Außenseite die aktive Außenbeschaltung desselben mit drei Operationsverstärkern und einen Hallsensor zum magnetfeldgesteuerten Ein- und Ausschalten des Implantats.

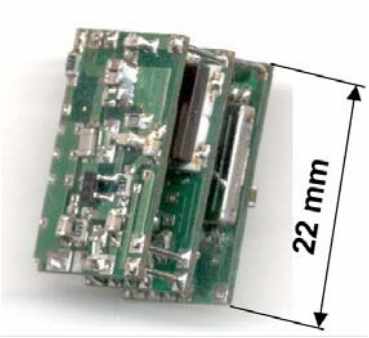


Bild 24: Leiterplattenaufbau des Implantats

Die mittlere Platine enthält den Mikroprozessor mit dem A/D-Wandler und die dritte Platine trägt den Sendeschaltkreis auf ihrer Innenseite und auf der Außenseite einen diskret aufgebauten selektiven Leistungsverstärker,

der die Leistung um ca. 10 dB auf etwa 10 mW erhöht. Schaltplan und Layouts wurden mit dem Programm „Eagle 4.09“ erstellt, die Platinen wurden aus 0,5 mm starkem Material FR4 in 2,5 mil Technologie realisiert.

Die Bestückung der drei Leiterplatten des Implantats erfolgte für die Muster manuell, kann aber später nach dem Reflow-Verfahren erfolgen, mit Ausnahme des Beschleunigungssensors. Dieser muss manuell nach bestückt werden. Dabei ist auf eine Isolation zwischen Sensorunterseite und Leiterplatte zu achten. Des weiteren wird der Sensor mit einem lichtundurchlässigen Lack (siehe Anhang) überzogen. Speziell auf die Oberseite des Sensors darf kein mechanischer Druck ausgeübt werden.

Die drei Leiterplatten werden mittels Drahtbrücken aus 0,3 mm verzinntem Schaltdraht über die dafür vorgesehenen Lötpads miteinander verbunden. Der Abstand der sich gegenüberstehenden Bauelemente zwischen den Leiterplatten soll an der engsten Stelle weniger als 0,2 mm betragen.

An die vorgesehenen Lötpads auf der Analogplatine werden die (0,3 mm Cul-) Drähte zum Akku und zu den Ladeanschlüssen angelötet. Am Antennenanschluss der Sendeplatine wird die an den Außenkanten des Implantat verlaufende Drahtantenne aus 0,3 mm versilbertem Kupferdraht angeschlossen. Die Antenne wird vor dem Vergießen durch kleine Stege aus Leiterplattenmaterial in ihrer Lage fixiert (**Bild 25**).

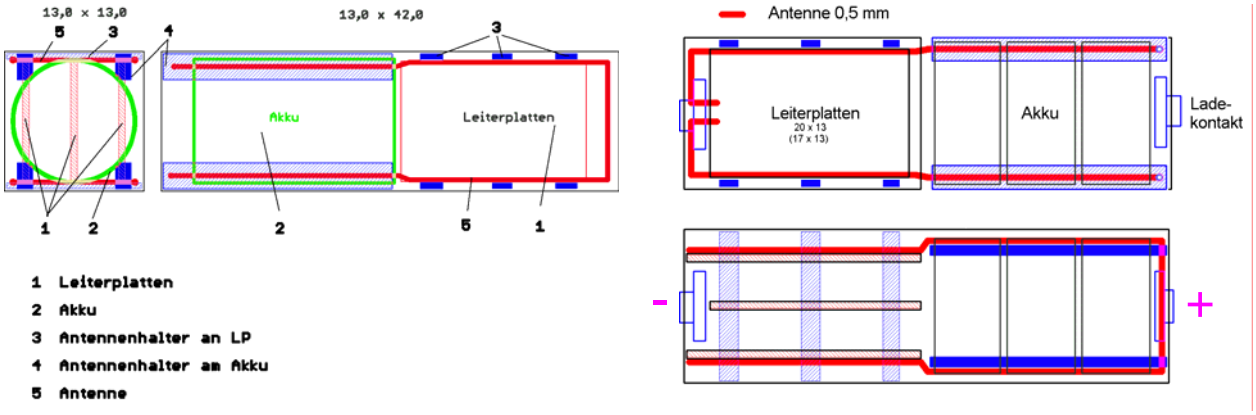


Bild 25: Montage des Implantats und Lage der Antenne (mit Polarität der Ladekontakte)

Der Leiterplattenblock bildet mit einem Ladekontakt das eine Ende des Implantats, der Akkublock mit dem zweiten Ladeanschluss das andere Ende. Die Ladekontakte aus Edelstahl befinden sich mittig an den Stirnseiten (oben und unten) und sind über Kupferlackdraht mit der Leiterplatte verbunden.

Anfang und Ende der Antenne bleiben nach dem Eingießen zugänglich, um die konkrete Antennenimpedanz optimal an den Ausgang des Hochfrequenzsenders anzupassen. Die Aussparung für den Anschluss des Impedanzmessgerätes sowie die Anpassungsbauelemente wird nach erfolgter Anpassung ebenfalls vergossen.

Das gesamte Implantat (Leiterplatten, Akku, Antenne) wird in Epoxydharz eingegossen. Hierzu wurde eine Gießform erstellt, die aus mehreren Teilen besteht. In diese Form wird das fertig verdrahtete Implantat eingelegt und ausgerichtet. Die Form wird mit Epoxydharz (siehe Anhang) vollständig ausgegossen. Nach dem Aushärten wird die Gießform zerlegt, das Implantat entnommen und anschließend auf der offenen Seite der Gießform auf Maß gefräst.

Vor dem Eingießen ist der Akku vollständig aufzuladen und an seinen Enden mit dem bereits für die Lichtdichtigkeit des Sensorschaltkreises genutzten Acryllack zu bestreichen, um eine ladezustandsbedingte Längenänderung des Akkus ohne Risse im Gussteil tolerieren zu können!

Wenn das Implantat seine endgültigen Maße besitzt, kann der Antennenabgleich erfolgen. Anschließend wird diese Aussparung ebenfalls mit Epoxydharz vergossen.

Von außen sind danach nur noch die beiden Ladekontakte (**Bild 26**) zugänglich. Durch eine Entkopplungsdiode und zwei HF-Induktivitäten ist dafür gesorgt, dass keine Elektrolyse an den Ladeelektroden auftritt, die den Akku entladen oder das Hochfrequenzabstrahlverhalten des Implantats beeinflussen könnte.

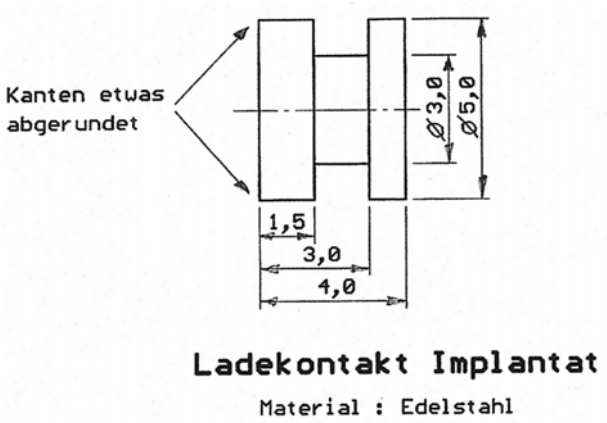


Bild 26: Ladekontakt (benötigt werden zwei Stück)

1.3.1.2 Implantatgehäuse

Es wurden die Varianten Gehäuse kontra Harzgießstück diskutiert:

	Gehäuse	**Harzgießstück**
Vorteile	⇨ Stromquelle wechselbar (egal ob Primär- oder Sekundärzellen (Akkus) ⇨ geringe Dichte des Gesamtgerätes möglich	⇨ Innenleben dauerhaft fixiert, kaum Schwingungen innerhalb des Implantats ⇨ dauerhaft wasser- und fruchtsäuredicht ⇨ preisgünstig ⇨ geringste Außenabmessungen möglich
Nachteile	⇨ Dichtigkeit des Gehäuses muss nach jeder Öffnung wieder hergestellt werden, in schmutziger Umgebung schwierig realisierbar ⇨ größere Außenabmessungen als bei Verguss ⇨ im ersten Entwurf sehr kleine (verlierbare) Schrauben verwendet ⇨ weniger preisgünstig, da wegen geringer Abmessungen hohe Anforderungen an präzise Maße ⇨ wird das Innenleben nicht vergossen, besteht die Gefahr, dass mechanische Schwingungen der Bauelemente das Messergebnis verändern könnten	⇨ gesamtes Innenleben inklusive (verschleißender) Stromquelle nicht auswechselbar / reparierbar ⇨ es können somit keine Primärelemente zur Stromversorgung genutzt werden, die ihrerseits eine erheblich längere ununterbrochene Messdauer ermöglichen würden als Akkus

Entsprechend dem ursprünglichen Vorhaben, das Implantat mit einer Batterie aus Primärelementen zu betreiben, wurde zuerst vorgesehen, ein wasserdichtes Gehäuse mit Öffnungsmöglichkeit zu verwenden (**Bild 27**).

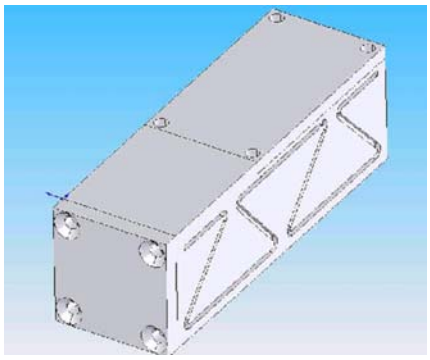


Bild 27: Entwurf für ein Gehäuse mit Aussparungen für die ursprünglich vorgesehenen mäanderförmigen Antennen

Schließlich fiel die Wahl auf die Lösung, das Implantat mit einem (wieder aufladbaren) Akku zu versehen und mit Epoxydharz zu vergießen, eine Lösung, die angesichts der hohen maximalen Beschleunigung von 200 G (200-fache Erdbeschleunigung) mehr Funktionssicherheit geben soll (**Bild 28**).

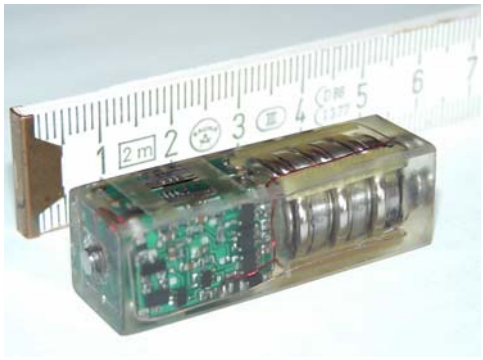


Bild 28: realisierte Gehäusevariante in Form eines Epoxydharz-Gießstücks

1.3.2 Empfangseinheit

Die Empfangseinheit besteht aus den Baugruppen Hochfrequenzempfänger mit zwei Antennen, einem Kopfhörer, an dem der Hochfrequenzempfänger mechanisch befestigt ist, sowie dem Handgerät mit der Synchronisations- und Datenaufbereitungseinheit und der USB-Schnittstelle zum PC (**Bild 29**). Die Empfangseinheit wird über die USB-Schnittstelle vom PC mit Strom versorgt.

Bild 29: Prototyp der Empfangseinheit (HF-Empfänger oben auf dem Kopfhörerbügel montiert, Handgerät zwischen die Ohrmuscheln gelegt)

1.3.2.1 Hochfrequenzempfänger

Der Hochfrequenzempfänger besteht aus drei Platinen:

- Grundplatine
- 2 Stück Empfängerplatine mit dem hochintegrierten Hochfrequenzempfängerschaltkreis RX3000, dem Pendant zum verwendeten Sendeschaltkreis des Implantats

Die Grundplatine enthält neben der Spannungsstabilisierung für die beiden Empfänger und Treibern für die Auskopplung der digitalen Signalströme zwei selektive Vorverstärker, die die Antennensignale verstärken. Schaltplan und Layouts wurden mit dem Programm „Eagle 4.09“ erstellt, die Platinen wurden aus 1,5 mm starkem Material FR4 in 2,5 mil Technologie realisiert. Alle Bauelemente der drei Platinen sind Reflow-lötbar. Die Empfängerplatinen werden nach dem Funktionstest mit kurzen verzinnten Drähten auf die Grundplatine aufgelötet.

Der Hochfrequenzempfänger (**Bild 30**) wird in ein HF-dichtes Gehäuse montiert und über eine nicht lösbare Verbindungsleitung mit dem Handgerät verbunden. Über diese Leitung wird auch das Signal für den Kopfhörer geführt, an dessen Bügel der Hochfrequenzempfänger mechanisch befestigt ist.

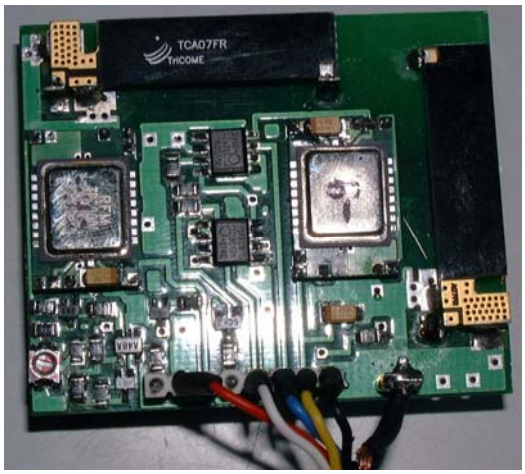


Bild 30: Hochfrequenzempfänger (hier mit kleinen Flachantennen)

1.3.2.2 Handgerät

Das Handgerät (**Bild 31**) bildet die Schnittstelle zwischen dem Hochfrequenzempfänger und dem PC sowie die Bedienschnittstelle für den Nutzer und realisiert folgende Funktionen:

- Stromversorgung aller Empfängerkomponenten aus der USB-Schnittstelle
- Synchronisation auf die Empfangsdatenströme des Hochfrequenzempfängers
- Zusammenführung der Empfangsdatenströme des Hochfrequenzempfängers im Sinne eines Diversity-Empfangs
- Abfrage von insgesamt fünf Bedientasten, drei davon dienen der Eingabe von Zeitmarken, mit denen der Nutzer beliebige Ereignisse, die in zeitlichem Zusammenhang mit der Messung stehen, markieren kann.

Bild 31: Handgerät *(hier noch ohne Beschriftung)*

- Später ist im Daten-Zeit-Diagramm die zu einem bestimmten Zeitpunkt gedrückte Taste erkennbar. Zwei weitere Tasten dienen der Fernbedienung von Start und Beendigung einer Messreihe, ohne die PC-Tastatur zu bemühen.
- Anzeige von Statusinformationen zum Empfangssystem mit insgesamt 6 Leuchtdioden:
  - Spannung vorhanden „PWR“
  - Verbindung zum PC-Programm hergestellt, PC-Programm läuft - ist nicht abgestürzt „PC“
  - Aufzeichnung läuft „REC“
  - Hochfrequenz wird empfangen „RX“
  - Implantat gefunden (typisches Signalmuster erkannt) „ID“
  - Synchronisation hergestellt (PLL eingerastet) „Sync“
- Erzeugen eines Analogsignals zur Ansteuerung des Kopfhörers, dabei handelt es sich um die Oder-Verknüpfung der drei (noch immer logarithmierten) 6-Bit-Datensignale. Durch die Logarithmierung sind auch kleine Signale gut hörbar. Die Kopfhörerwiedergabe ermöglicht eine akustische Online-Kontrolle des Belastungsverlaufs. Sie ermöglicht bei vermisstem Implantat das Wiederfinden durch Klopfen auf die Frucht, in der es vermutet wird. Außerdem können über den Kopfhörer Funkprobleme online erkannt werden (durch plötzliches Aufrauschen).

Die Komponenten des Handgerätes sind bis auf die 5 Tasten, welche am Gehäusedeckel befestigt sind (**Bild 32**), vollständig auf einer Leiterplatte untergebracht. Über drei interne Steckverbinder sind das USB-Kabel zum PC das Kabel zum Hochfrequenzempfänger und zum Kopfhörer angeschlossen.

Über drei weitere Steckverbinder können die auf der Platine des Handgerätes vorhandenen drei programmierbaren Schaltkreise (zwei Mikrocontroller und ein FPGA - Programmierbarer Logikschaltkreis) programmiert und konfiguriert werden. Das Gerät ist somit auch für zukünftige Weiterentwicklungen offen, zumal nicht nur die Algorithmen der Signalverarbeitung über die Software verändert werden können, sondern sogar die Topologie der Schaltung über den FPGA. Schaltplan und Layouts der Platine wurden mit dem Programm „Eagle 4.13“ erstellt.

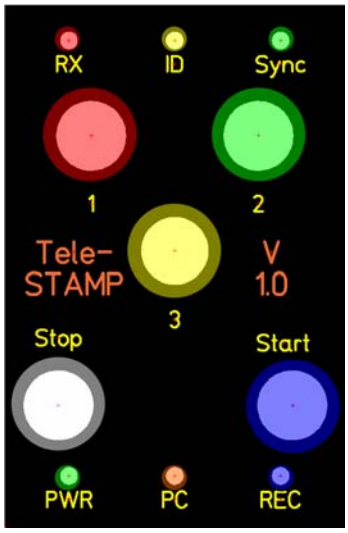


Bild 32: Handgerät - Frontplatte

1.4 Software

Im Rahmen des Projektes entstand eine Reihe von Softwaremodulen, die dem Betrieb und der Bedienung des Systems dienen:

1.4.1 Software im Implantat

Das Implantat enthält als zentralen Baustein zur Ablaufsteuerung einen - einmal programmierbaren (OTP - One Time Programmable) - Mikrocontroller PIC16C56SS, der mit 4,19 MHz getaktet ist (Keramikresonator s.o.). Die Software für das Implantat ist in Assembler mit Hilfe des Programms „MPLab“ geschrieben.

Die Software erfüllt folgende Aufgaben:

- Initialisieren der Hardware (A/D-Wandler, Hochfrequenzsender)
- 3000 mal je Sekunde:
  - für 3 Kanäle:
    - Auswahl eines A/D-Wandler-Kanals
    - Starten der A/D-Wandlung (Messung)
    - Auslesen des A/D-Wandlers (10 Bit seriell)
    - Separieren des Vorzeichens
    - Begrenzen auf 8 Bit
    - Wandlung 8 Bit ➔ 6 Bit über Tabelle
    - Invertieren jedes zweiten Bits
    - Senden der Bits (Erzeugen der Sendeimpulsfolge entsprechend vorgegebenem Signalschema inklusive der Synchroninformation, s.o.)

Um bei der zum Zweck eines niedrigen Stromverbrauchs mit 4,19 MHz niedrig gewählten Taktfrequenz alle notwendigen Aufgaben erfüllen zu können, werden die Aufgaben innerhalb der Software ohne Verzweigungen oder Unterprogrammaufrufe ineinander verschachtelt ausgeführt. Es besteht daher nur wenig Freiraum für Veränderungen.

1.4.2 Software im Empfänger

Der Empfänger, konkret das Handgerät enthält zwei Stück Mikrocontroller AT90S2313S, die der Synchronisation des Empfängers auf den gesendeten Datenstrom, der Anzeige von Statusinformationen, der Abfrage von Bedientasten und der Kommunikation mit dem PC dienen. Die Software beider Mikrocontroller ist in Assembler geschrieben und auf das Zielsystem transferiert mit der Editor- / Assemblersoftware „AVR Studio 4“.

Die Aufgaben sind entsprechend dem Hardwarekonzept auf die beiden Mikrocontroller verteilt.

1.4.2.1 Synchronisation

Der - im Signalweg - erste Mikrocontroller IC2 ist selbst Bestandteil der Hardware-PLL. Er wird vom VCXO der PLL getaktet und realisiert innerhalb der PLL einen - sich selbst einstellenden - programmierbaren Teiler.

Seine Software realisiert folgende Aufgaben:

- Initialisieren der Hardware (Ports, Timer)
- Timer-Interrupt-gesteuertes repetiertes Ausgeben des Referenzsignals für die PLL
- Steuerung der Timer-Konstanten zur automatischen Anpassung des PLL-Teilungsfaktors entsprechend der Informationen über die Frequenz- / Phasenlage zur Anpassung an die aktuelle Frequenz des Keramikresonators des Implantats (s.o.)
- Timer-Interrupt-gesteuerte repetierte Ausgabe von Abtastpulsen zur zeitkorrekten Entnahme der Datenbits und der Pauseninformation aus dem empfangenen Rohdatenstrom

1.4.2.2 Schnittstelle zum PC

Der - im Signalweg - zweite Mikrocontroller IC3 wird mit einem 11 MHz-Quarz getaktet. Er wird durch die vom ersten Mikrocontroller erzeugten Abtastimpulse interruptgesteuert und realisiert folgende Aufgaben:

- Initialisieren der Hardware (Ports, Timer, serielle Schnittstelle)
- Interrupt-gesteuertes repetiertes Einlesen der durch den FPGA aufbereiteten Datenbits und Pauseninformation beider Empfangskanäle

- Bewerten und Zusammensetzung der Informationen beider Empfangskanäle mit Hilfe einer Diversity-Tabelle ➔ Ermitteln des wahrscheinlichsten gesendeten Datenworts
- Aufheben der bitweisen Inversion jedes zweiten gesendeten Datenbits
- Zusammensetzen der Datenworte aller drei Kanäle und repetierte Ausgabe als pulsweitenmoduliertes Analogsignal zur Ausgabe als Soundinformation für den Kopfhörer
- repetierte Abfrage von insgesamt 5 Bedientasten
- Übertragung der Datenworte aller drei Kanäle zuzüglich eines Steuerdatenwortes, welches die Tasteninformation enthält, nach Anforderung an den PC via bidirektionaler serieller Schnittstelle
- Ansteuerung zweier Leuchtdioden zur Anzeige der Informationen „PC-Programm läuft“ und „Aufzeichnung läuft“
- ständige Überprüfen der eigenen Funktionalität (nicht abgestürzt), ggf. automatisches Rücksetzen über einen Watchdog-Timer

1.4.2.3 FPGA - konfigurierte Hardware

Zentraler Baustein der Empfängerbaugruppe ist ein softwarekonfiguriertes Logikarray EPM7128-J84/15 mit 2500 Gatterfunktionen.

Dieser realisiert folgende Funktionen:

- Erkennen und Abtrennen der Synchroninformation aus den Signalströmen beider Empfangskanäle, nur dann wenn diese vollständig vorliegen
- störunterdrückter Phasenvergleich der Synchroninformation mit dem Referenzsignal des ersten Mikrocontrollers IC2
- Ausblenden der Phaseninformation bei fehlendem Synchronsignal (➔ Speicherung der letzten Phaseninformation während gestörter Übertragung)
- Frequenzvergleich von Synchron- und Referenzinformation, um die Synchronisation auch bei größeren Frequenzunterschieden zu ermöglichen (Keramikresonatorproblem)
- Zusammenführen der Informationen von Phasen- und Frequenzvergleich zur Ansteuerung der Ladungspumpe
- Aufbereitung der Datenbits und Pauseninformation durch gesteuerte Entnahme aus den Empfangssignalen mit Hilfe des Abtastsignals des ersten Mikrocontrollers IC2
- Erzeugen von Statusinformationen (Empfangssignal vorhanden, Implantattypische Synchroninformation gefunden, PLL eingerastet) zur Darstellung durch Leuchtdioden, zur Information an die beiden Mikrocontroller und zur Weitergabe an den PC

Die Konfiguration für den FPGA wurde grafisch als Schaltbild mit Hilfe der Software „MAX+PLUS II“ von Altera erstellt und auf das Zielsystem übertragen.

1.4.3 Software im PC

Für die Steuerung des Systems und Datenaufzeichnung / -darstellung wurde ein Bedien- und Auswerteprogramm erstellt.

Spezifikation / Systemvoraussetzungen

Entwicklungsumgebung : LabVIEW ® 7.1

Betriebssystem : Windows 2000 ® und Windows XP ®

Hardwareanforderungen : Pentium ® III ab 800 MHz oder gleichwertiger Prozessor mit USB Schnittstelle

Die Bediensoftware realisiert folgende Funktionen:

- Verwaltung von Nutzerprofilen, nutzerspezifische Speicherung von Konfigurationsdatensätzen (**Bild 33**)

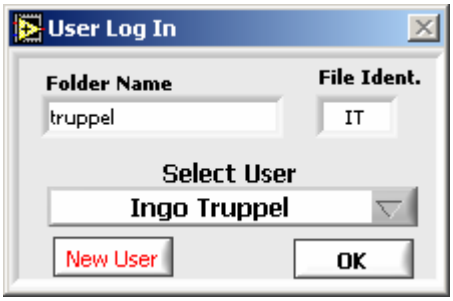


Bild 33: Log In Fenster des Programms

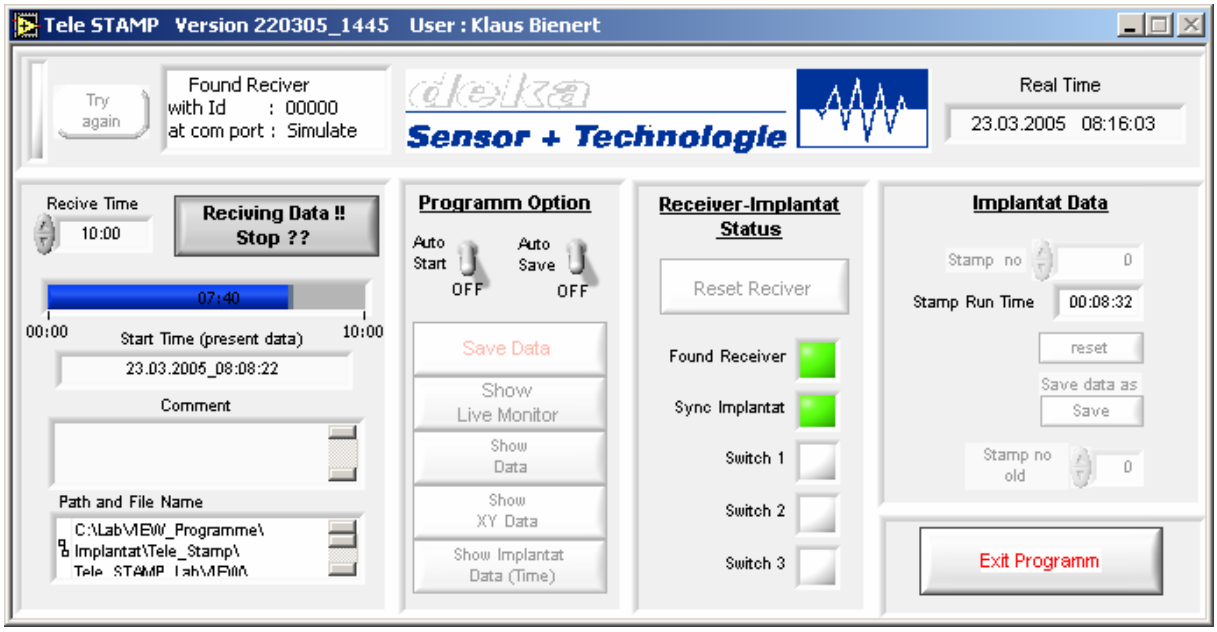


Bild 34: Anzeige- und Bedienfenster des Programms

– Kommunikation mit der Empfangseinheit über USB-Schnittstelle
– Anzeige von Statusinformationen (Empfänger gefunden, synchronisiert) (**Bild 34**)
– Ermitteln der tatsächlichen Abtastrate des Implantats entsprechend der Frequenz des Keramikresonators (wichtig zur exakten Synchronisation mit parallel zur Messung verlaufenden Prozessen➔ z.B. für Kalibrierung) (**Bild 35**)

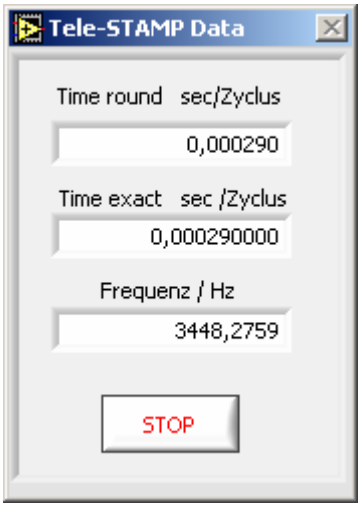


Bild 35: Programmfenster zur Betriebsdatenanzeige

– Rückgängigmachen der senderseitigen Logarithmierung der Messsignale
– Korrektur von Fehlern bei der Datenübertragung
– Verwalten von implantatspezifischen Kalibrationsdatensätzen
– Abbilden der Messdaten auf eine geeichte Skale (nach Kalibration)
– wahlweise Glättung der Messwerte
– Addition der Messwerte aller drei Kanäle zu einem Vektorsummensignal

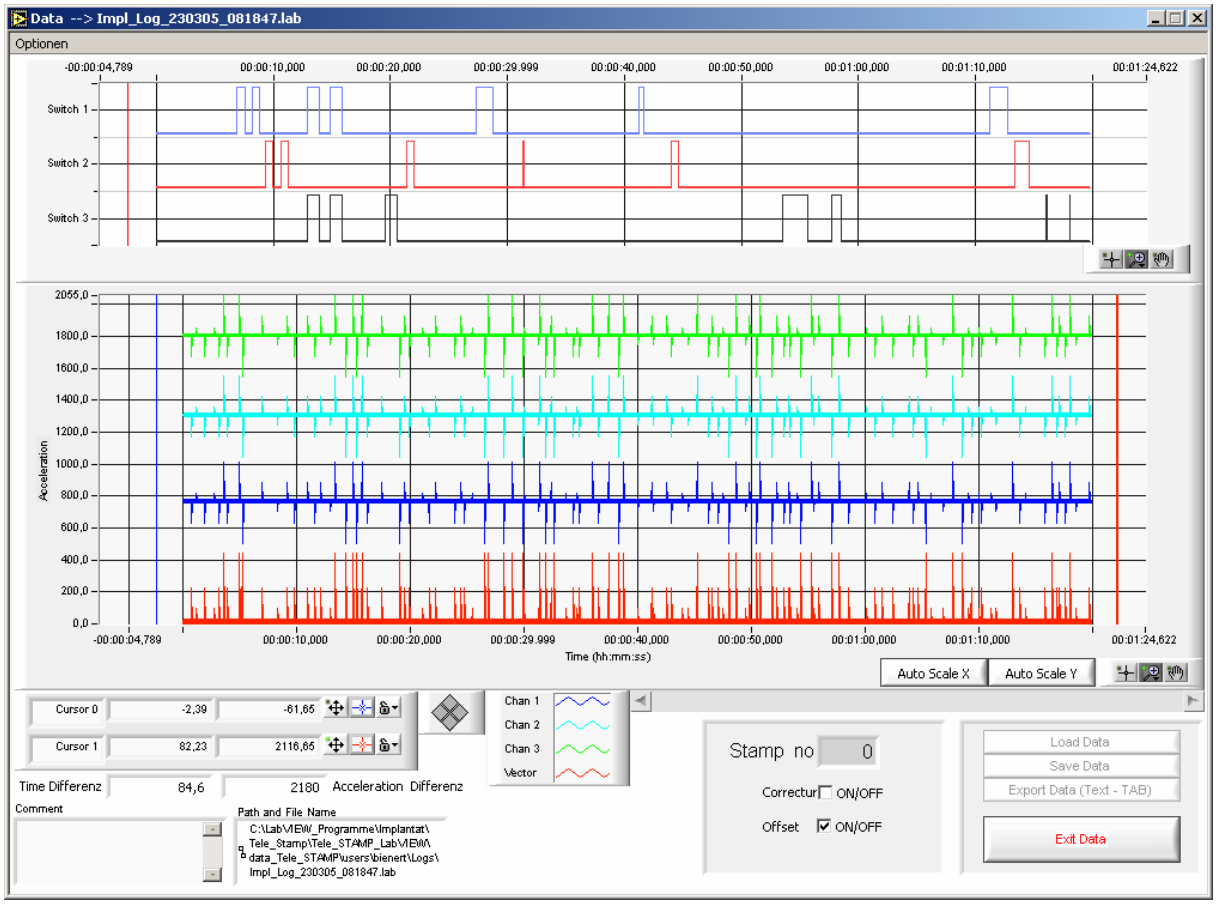


Bild 36: Programmfenster für die Datenaufzeichnung

- zeitrichtige Darstellung der Messwerte wie auch der Information über gedrückte Zeitmarkentasten (Switch 1..3) sowohl online während der Messung als auch offline nach der Messung (**Bild 36**)
- Speicherung der Messdaten
- nutzerbedarfsgesteuerte Datenreduktion
- Export beliebiger Ausschnitte der Messdaten in Form von ASCII-Tabellen zur Weiterverarbeitung mit externer Software
- Browsen in den aufgezeichneten Daten mit beliebigem Zoom

Zur Software gehört eine Bedienungsanleitung, die Bedienung und Pflege des Gesamtsystems umfasst.

Zur Kontrolle der Funktionsfähigkeit softwareinterner Abläufe existiert ein dem normalen Nutzer nicht ohne weiteres zugängliches Modul (Simulator) zur Simulation von Empfängerhardware und Sender ➔ kann auch zu Schulungs- und Demonstrationszwecken genutzt werden

1.5 Kalibrierung

Das System wird nach erfolgreicher Inbetriebnahme vom Hersteller in einer künstlichen Hülle kalibriert. Die Kalibration erfolgt durch gezieltes Erzeugen von Beschleunigungsereignissen bei Fallenlassen und Stoß auf eine elastische Prallplatte mit Kraftsensor. Parallel werden die Daten durch das hier beschriebene (Messdaten) und das parallel aufzeichnende Kraftmesssystem (Referenzdaten) erfasst und gespeichert. In einer offline arbeitenden Prozedur werden Mess- und Referenzdaten miteinander verglichen und für jeden der drei Messkanäle ein Kalibrierfaktor errechnet. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 37** schematisch dargestellt.

Das Implantat wird - mit voll aufgeladenem Akku - mittels Terostatmasse in einer Gummihohlkugel von 62 mm Ø, bestehend aus zwei 4 mm dicken Gummihalbschalen möglichst mittig fixiert. Dabei soll sich möglichst keine Luft mehr zwischen den Gummihalbschalen befinden. Die Kugel wird mit selbstklebendem beschriftbarem Plastikklebeband zusammengehalten, das in drei jeweils um 90° zueinander versetzten Ringen um die Kugel geklebt wird. Auf diesem Band wird nun eine Anzahl von 18 etwa gleichmäßig über die Oberfläche der Kugel verteilten Zahlen geschrieben (wasserfester Stift).

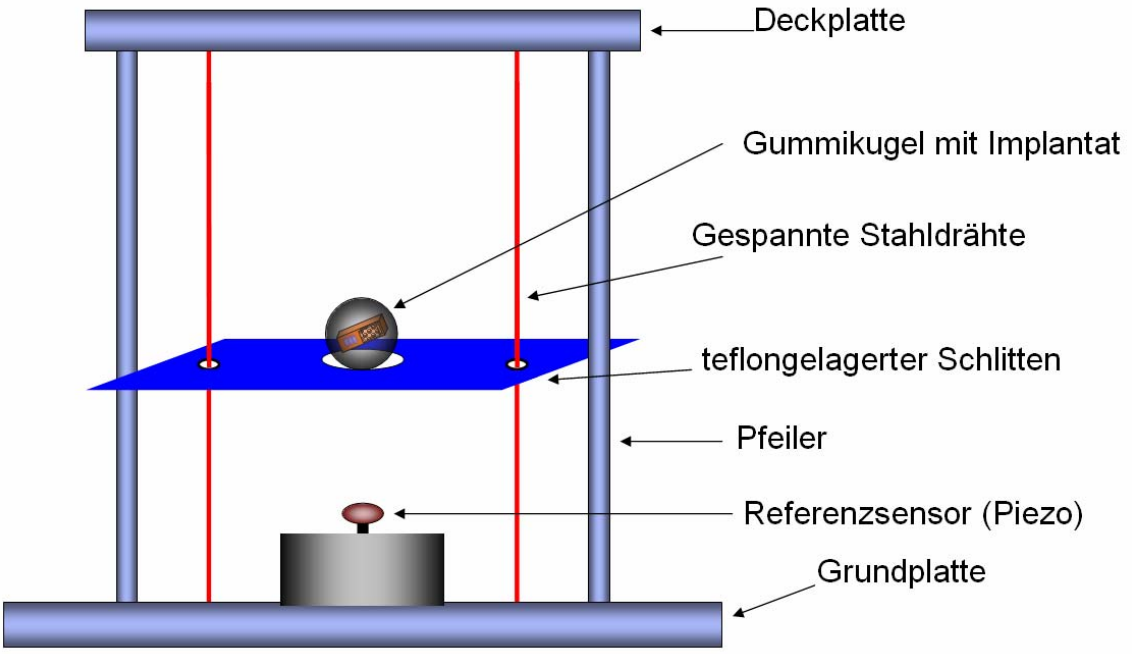


Bild 37: Aufbau der Versuchseinrichtung

Die Kugel mit dem Implantat wird auf einen an zwei Drähten reibungsarm geführten Kunststoffschlitten gelegt und dann zusammen mit diesem ab einer markierten Höhe fallengelassen. Sie prallt dabei auf eine Platte mit Piezokraftsensor, dessen Messsignal unverstärkt mit einer PCMCIA-Messkarte mit einer Messrate von 10.000 Messungen je Sekunde aufgezeichnet wird. Die Software hierzu wurde im ATB erstellt. Dieser Fallvorgang wird mehrfach wiederholt, wobei darauf geachtet wird, dass jeweils eine der Ziffern,

die sich auf der Kugeloberfläche befinden, möglichst genau nach oben zeigt. Es wird darauf geachtet, dass jede Zahl auf der Kugeloberfläche etwa gleich oft nach oben zeigt. Beim Fall der Kugel auf den Referenzaufnehmer bewegt sich der Schlitten weiter, so dass nur die Kugel ein Referenzsignal erzeugt.

Die nachfolgend beschriebene Prozedur der Zusammenführung der aufgezeichneten Messdaten beider Messsysteme (Implantat und Piezokraftmesser) berücksichtigt die Tatsache, dass es nahezu unmöglich ist, das Implantat in jeweils genau einer Achse definiert zu beanspruchen und genau diese Beanspruchung als Referenz aufzuzeichnen. Daher wurde - wie eben beschrieben - versucht, Messwerte aus möglichst vielen verschiedenen Raumwinkeln zu erfassen.

Es wird nun ein Kalibrierprogramm gestartet, das folgende Funktionen realisiert:

- Finden der Belastungsimpulse in beiden Datenreihen (Messung und Referenz) und Verwerfen allen Rests (Rauschen)
- Interpolieren beider Datenreihen (Messung und Referenz) auf die gleiche Zeitbasis
- Synchronisieren beider Zeitreihen, so dass korrespondierende Zeitpunkte von Mess- und Referenzreihe für jedes aufgezeichnete Ereignis zeitlich übereinander liegen
- Aufstellen eines Gleichungssystems, indem für jeden Zeitpunkt t_i (von n Zeitpunkten, für die Daten vorliegen) eine Gleichung formuliert wird, die folgenden Aufbau hat:

  $a_M(i)^2=(kx*a_{Mxi})^2+(ky*a_{Myi})^2+(kz*a_{Mzi})^2$

  mit:

  $a_M(i)^2$ ... Quadrat der Gesamtbeschleunigung, gemessen mit Implantat

  kx ... gesuchte Konstante für X-Achse

  $a_{Mx}(i)$ ... unkalibrierter Messwert der X-Achse zum i-ten Zeitpunkt

  ky ... gesuchte Konstante für Y-Achse

  $a_{My}(i)$ ... unkalibrierter Messwert der Y-Achse zum i-ten Zeitpunkt

  kz ... gesuchte Konstante für Z-Achse

  $a_{Mz}(i)$ ... unkalibrierter Messwert der Z-Achse zum i-ten Zeitpunkt
- Berechnen der Quadratesumme des Fehlers zwischen Messung und Referenz über alle n Ereignisse:

  $qerr = {}_{i=1}\Sigma^{n} (a_M(i)^2 - a_R(i)^2)^2$

  mit:

  $a_M(i)^2$ ... Quadrat der Gesamtbeschleunigung, gemessen mit Implantat

  $a_R(i)^2$ ... Quadrat der Beschleunigung, gemessen mit Referenzmesssystem

  qerr ... Gesamtfehlersumme

  n... Zahl der in die Kalibrierung einbezogenen Zeitschritte

  i ... Laufvariable

Das Kalibrierprogramm variiert nun unter Nutzung einer Optimierungsroutine nach einer Monte-Carlo-Methode durch Würfeln die Faktoren kx, ky, kz mit dem Ziel der Minimierung des Gesamtfehlers qerr. Abbruchkriterium ist die (vorgebbare) minimale Änderung des Fehlers für eine bestimmte Zahl von Optimierungsschritten.

Das Verfahren mittelt dabei sowohl Fehler in den Raumwinkeln als auch durch die Nutzung aller Messpunkte der aufgezeichneten Kurven Fehler in der Linearität des Messsystems und erfordert keine - wesentlich komplizierter zu realisierende - Belastung in einzelnen Achsen. Das Kalibrierverfahren hat sich im ATB bei der Kalibrierung eines anderen mechanisch messenden Systems bereits bewährt.

1.6 Implantierverfahren

Zum Einpassen und Fixieren in einem realen Produkt ist ein längliches Stück aus dem Produkt zu entnehmen und an dessen Stelle das Implantat zu platzieren. An Produkten wie zum Beispiel Kartoffel oder Apfel lässt sich dieser Arbeitsgang mit Hilfe eines Korkbohrers von 15 mm Ø einfach ausführen (**Bild 38**). Man wählt an dem Produkt eine Abmessung ausreichender Größe, d.h. mindestens 2 cm größer als die Länge des Implantats. In dieser Richtung

Bild 38: Implantieren des Messkörpers in eine Kartoffel

wird ein zylindrisches Stück aus dem Produkt ausgestanzt. Seine Enden werden entsprechend der Produktabmessung passend geschnitten. Sie werden nach dem Einpressen des Implantats in mittige Position beiderseits von außen bündig in die verbleibenden Öffnungen eingefügt. Danach werden die Öffnungen mittels Klebeband versiegelt. Damit ist das Implantat zuverlässig fixiert, und äußere Veränderungen am Produkt werden auf ein Minimum begrenzt. Das Klebeband sollte einen auffälligen Farbkontrast gegenüber der Oberfläche des Produkts aufweisen und somit zur visuellen Kennzeichnung des Produkts geeignet sein, um das visuelle Identifizieren und Entnehmen am Ende der untersuchten Verfahrenslinie zu erleichtern.

1.7 Erreichte Ergebnisse

Insgesamt wurde ein vollständiges und funktionsfähiges System entwickelt und aufgebaut.

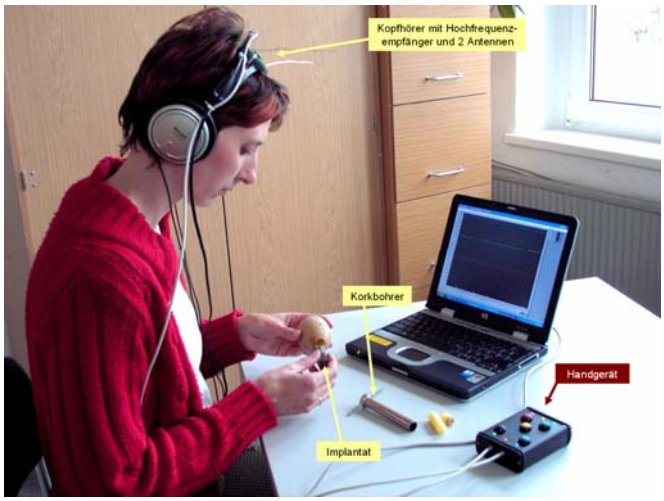


Bild 39: Gesamtsystem

Das System besteht aus dem Implantat, dem HF-Empfänger, dem Handgerät und einem Köpfhörer (**Bild 39**). Über USB-Schnittstelle wird es mit einem PC verbunden.

Die erreichten Ergebnisse entsprechen im wesentlichen der anfangs gestellten Zielspezifikation.

Geometrische und mechanische Parameter

maximale Abmessungen (Quader mit 13mm Seitenmaß)	Länge / mm	42
	größte Querabmessung / mm	~ 17,5
	Volumen /cm^3	7
Masse / g		15
Dichte / g/cm^3		2,1

Messtechnische Parameter:

Beschleunigungssensor:	Anzahl der Messachsen	3
	Messbereich / G (1 G = 9,81 m/s^2)	200
Signalverarbeitung:	Abtastrate / 1/s	~ 3200
	Messauflösung / Bit (jeder Kanal und Vektorsumme)	8
Betriebsparameter:	Ununterbrochene Einsatzdauer / h (mit wiederaufladbarem Akku)	> 5
	Betriebstemperaturbereich / °C	+5 ... +35
weitere Eigenschaften:	wasserdicht, fruchtsäurebeständig, da Epoxydharz vergossen	
	Funkreichweite / m	> 15

Datenverarbeitung:

Plattform	PC (Notebook), PIII ab 800MHz, Win2000 oder XP, USB-Schnittstelle
Datendarstellung	kalibrierte Beschleunigungs-/Zeit-Grafik (online und offline) alle drei Achsen und Vektorsumme, Zuordnung der Zeitmarken
Datenexport als ASCII-Tabelle	mehrspaltige Darstellung: Zeit, Beschleunigung, Zeitmarken

Kleinere Abweichungen gegenüber den anfangs geforderten Parametern bestehen hinsichtlich der Querabmessung und der Masse beziehungsweise der Dichte. Diese sind jedoch tolerierbar. Die größte Querabmessung von etwa 17,5 mm ergibt sich aus der Diagonalen des quadratischen Querschnittes mit Seitenlänge 13 mm. Das Einpassen in die gewünschten Produktarten wird gewährleistet. Die vorliegende Masse führt bei einer 100 g schweren Kartoffel zu einer Zunahme unter 5 %, und bei einem 150 g schweren Apfel zu einer Zunahme um weniger als 2 %.

Zwei weitere Bedingungen beeinflussen die Genauigkeit der Stoßmessung. Der Schwerpunkt des Produkts darf einerseits durch das Implantieren nicht wesentlich verschoben werden. Andererseits muss für eine korrekte Stoßmessung der Beschleunigungssensor im Schwerpunkt des Produkts platziert sein. Diese beiden Bedingungen lassen sich wegen des asymmetrischen Aufbaus des Implantats nicht vollständig realisieren. Eine quantitati-

ve Abschätzung des daraus resultierenden Messfehlers ist schwierig. Dieser Fehler wird aber ebenfalls als tolerierbar angesehen.

2 Zusammenfassung

Es wurde ein mobiles System zur Erfassung, drahtlosen Übertragung und computergestützten zeitnahen Darstellung und Auswertung von Messdaten (3 D Beschleunigungsdaten, insbesondere von Stoßvorgängen) entwickelt, dass sich durch folgende Eigenschaften auszeichnet:

- Extrem kleine und leichte, aber dennoch robuste Konstruktion der Datenerfassungs- und Sendeeinheit (Länge 42 mm, Breite 13 mm, Volumen 7 cm³, Masse 15 g, Verguss in Epoxydharz)
- Stoßbeschleunigungsmessbereich +/- 200 G (1 G = 0,81 m/s²), durch Änderung weniger Bauelementewerte im Implantat kann ein empfindlicherer Messbereich realisiert werden, so dass die Realisierung von Implantaten verschiedener Empfindlichkeitsklassen ohne aufwändige Neuentwicklung möglich ist
- Kontinuierliche 3-kanalige Übertragung der Messdaten (8 Bit plus Vorzeichen) mit hoher Abtastrate (3000 x simultan 3 Kanäle / Sekunde) über eine Zeitdauer von mindestens 5 Stunden
- Innovative Sender- und Empfängertechnik für zuverlässige Übertragung der Messdaten aus hochfeuchter Umgebung (Frucht) über mindestens 15 m Entfernung auch unter extrem ungünstigen Umgebungsbedingungen auf einer europaweit anmelde- und lizenzfrei nutzbaren Frequenz
- Einfache Möglichkeit zum Wiederaufladen der eingebauten Energiequelle (Akkumulator)
- Datenerfassungs- und Sendeeinheit implantierbar in beschädigungsempfindliche Produkte wie z.B. Kartoffel, Apfel, Möhre oder technische Güter
- Ein-/Ausschalten des Messsystems durch ein Magnetfeld auch im implantierten Zustand möglich
- System einsetzbar zur Erfassung und Beurteilung der mechanischen Stoßbelastungen empfindlicher Produkte durch logistische Prozesse (z.B. mechanische Ernte, Verlade-, Aufbereitungs-, Sortier- und Verpackungsprozesse)
- Signalisieren des Passierens kritischer Punkte in den Prozessen durch einfache manuelle Tastenbetätigung
- Kleine kompakte Empfangseinheit über Standard-Schnittstelle (USB) an nahezu jeden PC anschließbar (Stromversorgung ebenfalls über USB); kann während der Messung durch den Betreiber mitgeführt werden, so dass ein wesentlich größerer Applikationsradius abgedeckt werden kann, als die Funkreichweite erwarten ließe
- Akustische Online-Wiedergabe von Beschleunigungsereignissen über Kopfhörer; zusätzlich überwacht der Nutzer über den Kopfhörer ständig akustisch die Qualität der Funkverbindung

- Durch Anbringen der Antennen und Hochfrequenzempfänger am Kopfhörerbügel haben die Antennen eine günstige Position hoch über Grund; da der Nutzer während der Messung den Weg des Implantats mit den Augen verfolgt und somit den Kopf in dessen Richtung dreht, sind die Empfangsantennen immer optimal auf den Sender gerichtet
- Gesamtlösung kommerziell verfügbar zu vergleichsweise niedrigen Kosten

3 Literatur

BAGANZ K., ZIEMS K. (1967): Untersuchungen zur Beurteilungsmethodik von Kartoffelbeschädigungen. Archiv für Landtechnik, 6, 1, 21-36

BARREIRO P., STEINMETZ V., RUIZ-ALTISENT M. (1997): Neural bruise prediction models for fruit handling and machinery evaluation. Computers and Electronics in Agriculture, 18, pp. 91-103

BIELZA C., BARREIRO P., RODRIGUEZ-GALIANO M.I., MARTIN J. (2003): Logistic regression for simulating damage occurrence on a fruit grading line. Computers and Electronics in Agriculture, 39, 95-113

DAVID I. (1968): Künstliche Kartoffel als Messwertgeber zur Erfassung von Beschädigungsquellen in Kartoffelvollerntemaschinen. Deutsche Agrartechnik 18, 11, 541-542

FECHNER W., BÜSCHER W. (2000): Elektronische Messrübe mit 6 Beschleunigungs-sensoren. Landtechnik 55, 1, 42-43

GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V. (1999): Transport-Informations-Service. Fachinformationen der Deutschen Transportversicherer. Internetinformation: http://www.tis-gdv.de/tis/ware/inhalt.htm

HEROLD B., SIERING G. (1974): Erfassen von Beschädigungsursachen in Mechanisierungsmitteln der Kartoffelernte und –aufbereitung. Agrartechnik, 24, 2, 85-87

HEROLD B., HABELT R. (1992): Weniger Produktbeschädigungen durch exaktes Messen. Landtechnik 47, 1/2, 78-81

HEROLD B., TRUPPEL I., SIERING G., GEYER M. (1996): A Pressure Measuring Sphere for monitoring handling of fruit and vegetables. Computers and Electronics in Agriculture 15, pp. 73-88

HEROLD B., OBERBARNSCHEIDT B., GEYER M. (1998): Mechanical load and its Effect onBulb Onions due to Harvest and Post-harvest Handling. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol 71, Iss 4, pp 373-383

HEROLD B., TRUPPEL I., GEYER M., HOFFMANN T. (2002): A new approach to detect mechanical impacts onto potato tubers. Conference EAPR 2002, July 14-19, Hamburg, Germany, Abstracts of Papers and Posters, Poster 52, p. 246, ISSN 0723-7812

HEROLD B., TRUPPEL I., GEYER M. (2004): Mechanical Impact Detector implanted in Perishable Produce. Second International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Bio-Systems Engineering (ISMAB2004), Poster, Sept.21-23, 2004, Kobe University, Japan

HERPPICH W.B., MEMPEL H., GEYER M. (2000): Interactive Effects of Mechanical Impacts, Temperature and Humidity on Water Relations and Tissue Elasticity of Stored Carrots. Journal of Applied Botany – Angewandte Botanik 74, 271-276

MILNE F. (1995): Experiences with the use of the SAC Engineering's Simulated Electronic Produce (SEP). Proc. of the Meeting of the EAPR Section Engineering. KTBL Dethlingen, Germany, pp. 7-10

PANG D.W., STUDMAN C.J., BANKS N.H. (1994): Apple Bruising Thresholds for an Instrumented Sphere. Transactions of the ASAE, 37, 3, 893-897

PATENTSCHRIFT: "Vorrichtung und Verfahren zur Phasensynchronisation mit Hilfe eines Microcontrollers" eingereicht am 18.04.2005 beim Deutschen Patentamt unter dem Aktenzeichen: 10 2005 018 950.4, Anmelder: Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim e.V.

PETERS R. (2004): Vergleichsuntersuchung zur Arbeitsqualität zweireihiger Kartoffelroder. Internetinformation der KTBL Versuchsstation Dethlingen

http://www.ktbl.de/kartoffel/aktuell/maschinen.htm

QS HANDBUCH KARTOFFELN (2004): Leitfaden Produktion und Großhandel Kartoffel (http://www.q-s.info/de/handbuch/Kartoffeln), QS Qualität und Sicherheit GmbH, Margaretenstr. 1, 53175 Bonn

SELJASEN R., BENGTSSON G.B., HOFTUN H., VOGT G. (2001): Sensory and chemical changes in five varieties of carrot (Daucus carota L) in response to mechanical stress at harvest and post-harvest. J. of the Science of Food and Agriculture, 81: 436-447

SMART SPUD INFORMATION AND SPECIFICATION, (2003): Systembeschreibung im Internet (http://www.sensorwireless.com/products/brochures/spudflyer.pdf), Sensor Wireless Inc., 107 Watts Ave, Charlottetown, PE, CANADA C1E 2B7

STOLPER O. (2005): Die Wirksamkeit von Normen für Obst, Gemüse und Speisekartoffeln – eine Analyse anhand von Kontrollergebnissen in Süddeutschland. Schriftenreihe Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft 1 / 2005, ISSN 1611-4159

SUTOR P. (2005): Qualität von Tafeläpfeln im Einzelhandel – eine Marktanalyse 2002 bis 2004 für die Region Bayern. Schriftenreihe Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft 3 / 2005, ISSN 1611-4159

TENNES B.R., ZAPP H.R., BROWN G.K., EHLERT S.H. (1990): Advanced Instrumented Sphere (IS) for Impact measurements. Transactions of the ASAE, 33 (3), pp. 955-960

VAN CANNEYT T., TIJSKENS E., RAMON H., VERSCHOORE R., SONCK B. (2003): Characterisation of a Potato-shaped Instrumented Device. Biosystems Engineering, 86, 3, 275-285

VAN CANNEYT T., TIJSKENS E., RAMON H., VERSCHOORE R., SONCK B. (2004): Development of a Predictive Tissue Discolouration Model based on Electronic Potato Impacts. Biosystems Engineering, 88, 1, 81-93

XIN L., BRUSEWITZ G.H. (1994): Peach Bruise Tresholds using the Instrumented Sphere. Applied Engineering in Agriculture, 10, 4, 504-513

Bildverzeichnis

Bild 1: Verladen von Kartoffeln bei der Ernte 5

Bild 2: Entladen von Kartoffeln nach dem Transport 6

Bild 3: Unterschiedliche „elektronische Früchte“ im Vergleich (Stand 1995, von links nach rechts: PTR-100 aus Dänemark, PMS-60 aus Deutschland, Damage Detective aus UK, und IS100 aus USA) 15

Bild 4 Struktur der Zusammenarbeit der Projektpartner 17

Bild 5: Stoßrekorder I.R.D. (impact recording device) von TECHMARK (USA) 21

Bild 6: „Smart Spud“ System von SENSOR WIRELESS (Kanada) 22

Bild 7: Elektronische Kartoffel PTR-200 von SM Engineering (Dänemark) 23

Bild 8: Messestand zur Demonstration des implantierbaren Stoßsensors auf der AGRITECHNICA 2005 in Hannover (Rundlauf mit drei Gurtbandförderern) 27

Bild 9: Veranschaulichung des Potenzials des implantierbaren Stoßsensors zur dreidimensionalen Darstellung der Verteilung der gemessenen Stoßdaten an einer Modell-Kartoffel 28

Bild 10: Veranschaulichung des Potenzials des implantierbaren Stoßsensors zur drei-dimensionalen Darstellung der Verteilung der gemessenen Stoßdaten an einem Modell-Apfel 29

Bild 11: Technische Daten des verwendeten Beschleunigungssensors 34

Bild 12: Funk oder Logger? 35

Bild 13: schematischer Versuchsaufbau für Vorversuche 36

Bild 14: Signalschema des Implantats mit 16 Datenbits und einem Prüfbit 39

Bild 15: Signalschema mit verbesserter Synchroninformation (das Stoppbit entfiel später) 40

Bild 16: Implantat in Kartoffel (mit rotem Kunststoffband umklebt) in Abpackanlage 41

Bild 17: Temperaturcharakteristik des Keramikresonators 42

Bild 18: Übertragungsfunktionen für Sender und Empfänger 45

Bild 19: Darstellung des relativen Fehlers bei Reduktion von 8 auf 6 Bit 45

Bild 20: Signalschema für dreikanalige Übertragung 3 x (1 Vorzeichenbit + 6 Datenbit) 46

Bild 21: konfektioniertes Akkupack 47

Bild 22: Entladekurve V60HR 47

Bild 23: Ladeschale (Fa. Ansmann) und zusätzliche Einlage zur Fixierung des Implantats 48

Bild 24: Leiterplattenaufbau des Implantats 49

Bild 25: Montage des Implantats und Lage der Antenne (mit Polarität der Ladekontakte) 50

Bild 26: Ladekontakt (benötigt werden zwei Stück) 51

Bild 27: Entwurf für ein Gehäuse mit Aussparungen für die ursprünglich vorgesehenen mäanderförmigen Antennen 52
Bild 28: realisierte Gehäusevariante in Form eines Epoxydharz-Gießstücks 52
Bild 29: Prototyp der Empfangseinheit (HF-Empfänger oben auf dem Kopfhörerbügel montiert, Handgerät zwischen die Ohrmuscheln gelegt) 53
Bild 30: Hochfrequenzempfänger (hier mit kleinen Flachantennen) 54
Bild 31: Handgerät *(hier noch ohne Beschriftung)* 54
Bild 32: Handgerät – Frontplatte 56
Bild 33: Log In Fenster des Programms 59
Bild 34: Anzeige- und Bedienfenster des Programms 59
Bild 35: Programmfenster zur Betriebsdatenanzeige 60
Bild 36: Programmfenster für die Datenaufzeichnung 61
Bild 37: Aufbau der Versuchseinrichtung 62
Bild 38: Implantieren des Messkörpers in eine Kartoffel 64
Bild 39: Gesamtsystem 65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über kommerzielle miniaturisierte Stoßdatenerfassungssysteme 23

In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas^{TM}, Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005

Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005
Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer *Fuzzy-Logic*-Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern	
	Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005
Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005

Interessenten wenden sich an:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: (0331) 5699-820
Fax.: (0331) 5699-849
E-Mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €