



# Episodische Periodizität des bioelektrischen Potentials von Bäumen

Prof. Dr. Gerald J. Peschel und Dr. Hermann Lubenow

| Inhalt  | Seite |
|---|-------|
| Vorwort   |       |
| 1. Einleitung   | 2     |
| 2. Geoelektrische Eigenpotentiale   | 3     |
| 3. Bioelektrische Potentiale  | 4     |
| 4. Messtechnische Erfassung der Variationen des bioelektrischen Potentials von Bäumen | 6     |
| 5. Standort und Versuchsobjekte   | 9     |
| 6. Ergebnisse der Versuchsmessungen   | 12    |
| 7. Beziehungen zwischen den Biopotentialvariationen der Untersuchungsobjekte.         | 16    |
| 8. Beziehungen zwischen den Variationen der Umweltbedingungen und der Biopotentiale   | 17    |
| 9. Episodische Periodizität der verdunstungsabhängigen Biopotentialvariationen        | 22    |
| 10. Interpretation der Messergebnisse   | 31    |
| 11. Zusammenfassung   | 32    |
| 12. Anmerkungen und Literatur   | 32    |

## Vorwort

Die vorliegende Studie wurde von uns im Zeitraum vom 01.09.1999 bis 28.02.2001 mit Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie innerhalb des Programms "Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in kleinen und mittleren Unternehmen und externen Industrieforschungseinrichtungen in den neuen Bundesländern" entsprechend der Richtlinie des BMWi vom 25.11.1997 (Projektnummer 1324/99) durchführt.

Der Ergebnisbericht war nach Fertigstellung mehreren Forschungseinrichtungen und Forstämtern zur Information und Diskussion zur Verfügung gestellt worden.

Eine, nach gemeinsamer Beratung mit dem Landesamt für Forsten und Großschutzgebiete, Fritz-Reuter-Platz 9, 17139 Malchin angedachte kooperative Weiterführung konnte von uns aus Kapazitätsgründen nach Eingang eines Großauftrags der Hansestadt Hamburg leider nicht realisiert werden.

Im Zusammenhang mit der Aufarbeitung des Firmenarchivs sollen die bisher nicht veröffentlichten Ergebnisse in ergänzter und überarbeiteter Form hier für Interessenten zur Verfügung gestellt werden.

Greifswald 31.08.2021

**Geschäftssitz:**  
Hauptstraße 27,  
17498 Weitenhagen,

**Handelsregister:**  
B 1684 Amtsgericht  
Stralsund,

**Geschäftsführer:**  
Dr. Hermann Lubenow,

**Einzelprokura:**  
Prof. Dr. Gerald Peschel,

**Steuernummer:**  
084/106/02416,  
**Umsatzsteuer-  
Identnummer:**  
DE 13 75 80 226,

**Bankverbindung:**  
Volksbank  
Raiffeisenbank eG  
Greifswald,  
**BIC: GENODEF1ANK**  
**IBAN: DE1415061638**  
0001038460

Büro für ingenieurgeophysikalische Messungen GmbH  
Prof. Dr. Gerald J. Peschel, Stralsunder Straße 13, 17489 Greifswald  
Tel.: 03834-2440, Fax: 03834-777658, big-m.g.peschel@t-online.de,  
www.big-m-gmbh.de, www.gerald-peschel.de

## 1. Einleitung

Bei geophysikalischen Untersuchungen zur Erkundung von Erzlagerstätten, zur Erfassung der Bodenkontamination durch Deponien und Altlasten oder zur Aufklärung von Grundwasserströmungen nutzt man häufig die Tatsache, daß an der Erdoberfläche natürliche, quasi-statische elektrische Potentialfelder auftreten, die mit den interessierenden unterirdischen Objekten und Prozessen in ursächlichem Zusammenhang stehen. Sie werden mit sogenannten "Eigenpotentialmessungen" erfaßt, die einen, meß- und auswertungstechnisch gut ausgearbeiteten Zweig geoelektrischer Bodenuntersuchungen darstellen.

Die dabei gewonnenen Meßwerte enthalten jedoch häufig Einflüsse von anderen Potentialquellen, die nicht mit den zu untersuchenden Objekten und Prozessen zusammenhängen. Sie erschweren die Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf die zu lösende Aufgabenstellung und werden deshalb als "Störpotentiale" betrachtet.

Solche "Störpotentiale" im Sinne bestimmter geowissenschaftlicher und geotechnischer Aufgabenstellungen werden vermutlich auch durch Pflanzen und insbesondere durch Bäume verursacht und dann in der geophysikalischen Literatur als bioelektrische Potentiale bezeichnet. Sie sollen "immer am Auftreten negativer Spannungsdifferenzen zur Umgebung zu erkennen" sein und sich besonders dann von einem normalen - d.h. z. B. durch elektrokapillare Prozesse verursachten - Störpegel abheben, "wenn die Messungen vom offenen Gelände in bewachsene oder bewaldete Bereiche führen". Sie sollen mit elektrischen Potentialdifferenzen in der Größenordnung von mehreren 100 mV verbunden sein und dann durchaus Eigenpotentialanomalien von Erzlagerstätten vortäuschen können, die ebenfalls stets negativ sind. Zweifelsfrei nachgewiesen und systematisch untersucht wurden bioelektrische Störpotentiale bisher jedoch nicht.

Zur Überwindung der damit verbundenen Unsicherheit der Interpretation geoelektrischer Eigenpotentialmessungen wäre eine Erkennung der biologisch bedingten Anteile in den Meßergebnissen erforderlich, die von folgenden Überlegungen ausgehen kann: Bei geophysikalischen Eigenpotentialmessungen werden die auszumessenden elektrischen Spannungen zwischen verschiedenen Punkten im Raum als statische Größen betrachtet, die über einen längeren Zeitraum unveränderlich sind, oder deren zeitliche Variationen nur zufällige Schwankungen um einen konstanten Mittelwert darstellen (z.B. bei Sickerwässern in Deponien). Im Gegensatz dazu weisen die durch Lebensvorgänge geprägten bioelektrischen Potentiale wahrscheinlich charakteristische zeitliche Variationen auf, die die Veränderungen der auf die Vegetation einwirkenden Faktoren, wie Licht, Temperatur, Niederschläge usw. widerspiegeln.

Wenn es gelänge, eine solche Periodizität der bioelektrischen Störpotentiale nachzuweisen und zu beschreiben, könnte möglicherweise durch Ausmessung der natürlichen Eigenpotentialfelder über einen längeren Zeitraum und nachfolgende Eliminierung der bioelektrischen Störpotentiale durch Filterung eine bedeutende Steigerung der Aussagekraft dieser Untersuchungsmethodik zur Lösung geowissenschaftlicher und geotechnischer Aufgabenstellungen erreicht werden.

Andererseits könnte die dazu erforderliche Ermittlung von charakteristischen Eigenschaften der bioelektrischen Potentialvariationen vielleicht auch Informationen über die, solche Variationen verursachenden Lebensprozesse erbringen, die möglicherweise zur Beurteilung des Zustandes der Vegetation eines bestimmten Untersuchungsgebietes bzw. einzelner Bäume usw. genutzt werden können.

Ausgehend von dieser Problemsituation wurde in einer Langzeitstudie an drei ausgewählten Objekten untersucht, ob und in welcher Größenordnung bioelektrische Potentiale existieren, welche zeitlichen Variationen solche Potentiale aufweisen und wie deren Verlauf charakterisiert werden kann. Die Studie wurde im Zeitraum vom 01.09.1999 bis 28.02.2001 mit Förde-

rung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie innerhalb des Programms "Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in kleinen und mittleren Unternehmen und externen Industrieforschungseinrichtungen in den neuen Bundesländern", entsprechend der Richtlinie des BMWi vom 25.11.1997 (Projektnummer 1324/99) durchführt.

## 2. Geoelektrische Eigenpotentiale

Geoelektrische Eigenpotentiale im Boden und im geologischen Substrat werden durch elektrochemische Prozesse (Redoxpotential) oder durch Strömung von Grundwasser im Untergrund (Strömungs- oder Filtrationspotential) erzeugt.

Bei der Entstehung von Redoxpotentialen sind zwei unterschiedliche Mechanismen zu unterscheiden:

**Membranpotential:** An den Kontaktflächen zwischen Metallen bzw. deren Verbindungen, die im Gestein als Erzminerale vorliegen und dem, in den Gesteinsporen enthaltenen Grundwasser, das mit seinen gelösten Salzen ein Elektrolyt darstellt, sind die Ladungsträger auf beiden Seiten unterschiedlich stark gebunden. Man stellt sich das gewöhnlich so vor, als ob die Kontaktfläche eine Membran sei, die für unterschiedliche Ladungsträger in beiden Richtungen eine unterschiedliche Durchlässigkeit besitzt. Dadurch entsteht eine elektrische Spannung

$$U_m = -\frac{RT}{nF} \ln \frac{c_1}{c_2} \quad (1)$$

In dieser sog. Nernst - Gleichung bedeuten: R - Gaskonstante, T - absolute Temperatur, n - Wertigkeit, F - Faradaysche Zahl und  $c_1$ ,  $c_2$  - Elektrolytkonzentrationen auf beiden Seiten der Membran (bzw. Elektronendichten beim Graphit).

Eigenpotentialanomalien, die durch Membranpotential verursacht werden, treten vorwiegend an sulfidischen Erzkörpern und an graphitischen Gesteinen auf, unter bestimmten Bedingungen, z.B. in Bohrlöchern auch an Tonmineralien.

**Diffusionspotential:** Wenn innerhalb eines porösen Mediums Lösungen mit unterschiedlicher Ionenkonzentration aneinander grenzen tritt an der Grenzfläche eine osmotische Druckdifferenz auf, die bewirkt, dass Ionen aus der höher konzentrierten Lösung in die mit geringerer Konzentration diffundieren. Dies erfolgt für Ionen mit unterschiedlicher Beweglichkeit mit verschiedener Diffusionsgeschwindigkeit, so dass an der Grenzfläche eine elektrische Spannung entsteht. In diesem Fall ist die Nernst - Gleichung folgendermaßen zu modifizieren:

$$U_d = -\frac{v-u}{v+u} \frac{RT}{nF} \ln \frac{c_1}{c_2} \quad (2)$$

Die zusätzlich auftretenden Größen u und v charakterisieren die Beweglichkeit der Kationen und Anionen.

Diffusionspotentiale treten ebenfalls bei der Verwitterung von Erzmineralen im Einflussbereich sauerstoffreicher, oberflächennaher Grundwässer auf und überlagern sich mit den Membranpotentialen. Darüber hinaus entstehen sie überall dort, wo Wasser mit höherer oder niedrigerer Konzentration gelöster Salze in das "normale" Grundwasser eintritt. Das ist z.B. der Fall in der Nähe tektonischer Störungen, an denen hochkonzentrierte Salzlösungen aus dem Untergrund aufsteigen und im Bereich ungesicherter Deponien, wo Lösungen mit Sickerwässern in das Grundwasser eindringen.

Ein **Strömungspotential** (auch als **Filtrationspotential** bezeichnet) entsteht, wenn sich das in den Hohlräumen des Gesteins befindliche Elektrolyt bewegt. Die zur Herausbildung

des elektrischen Potentialfeldes erforderliche Ladungstrennung wird durch das Zusammenwirken von Membran- und Diffusionseffekten mit der Strömung bewirkt, indem Ionen mit höherer Beweglichkeit häufiger durch die Porenwand ins Gestein übertreten, während sich solche mit geringer Beweglichkeit länger mit der Strömung längs der Porenkanäle bewegen. Die dabei entstehende elektrische Spannung

$$U_s = fK\Delta p \quad (3)$$

hängt von der Druckdifferenz  $\Delta p$  in den Kapillaren und vom Koeffizienten der Elektrofiltrationsaktivität

$$K = \frac{\xi \varepsilon \rho}{4\pi \eta} \quad (4)$$

ab, der seinerseits bestimmt wird durch den spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$ , das elektrokinetische Potential  $\xi$ , die Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon$  und die dynamische Viskosität  $\eta$  des strömenden Stoffes und wird weiterhin von einer Materialkennziffer  $f$  des durchströmten Stoffes beeinflusst, die von dessen Porosität  $\varphi$ , von seiner Korngrößenverteilung  $V_k$  und von seinem Tongehalt  $t$  abhängt. Vor allem die Abhängigkeit von den drei zuletzt angeführten Parametern ist die Grundlage dafür, dass Messungen des Filtrationspotentials allgemein zum Nachweis und zur Untersuchung von Fließvorgängen des Wassers im Untergrund herangezogen werden können.

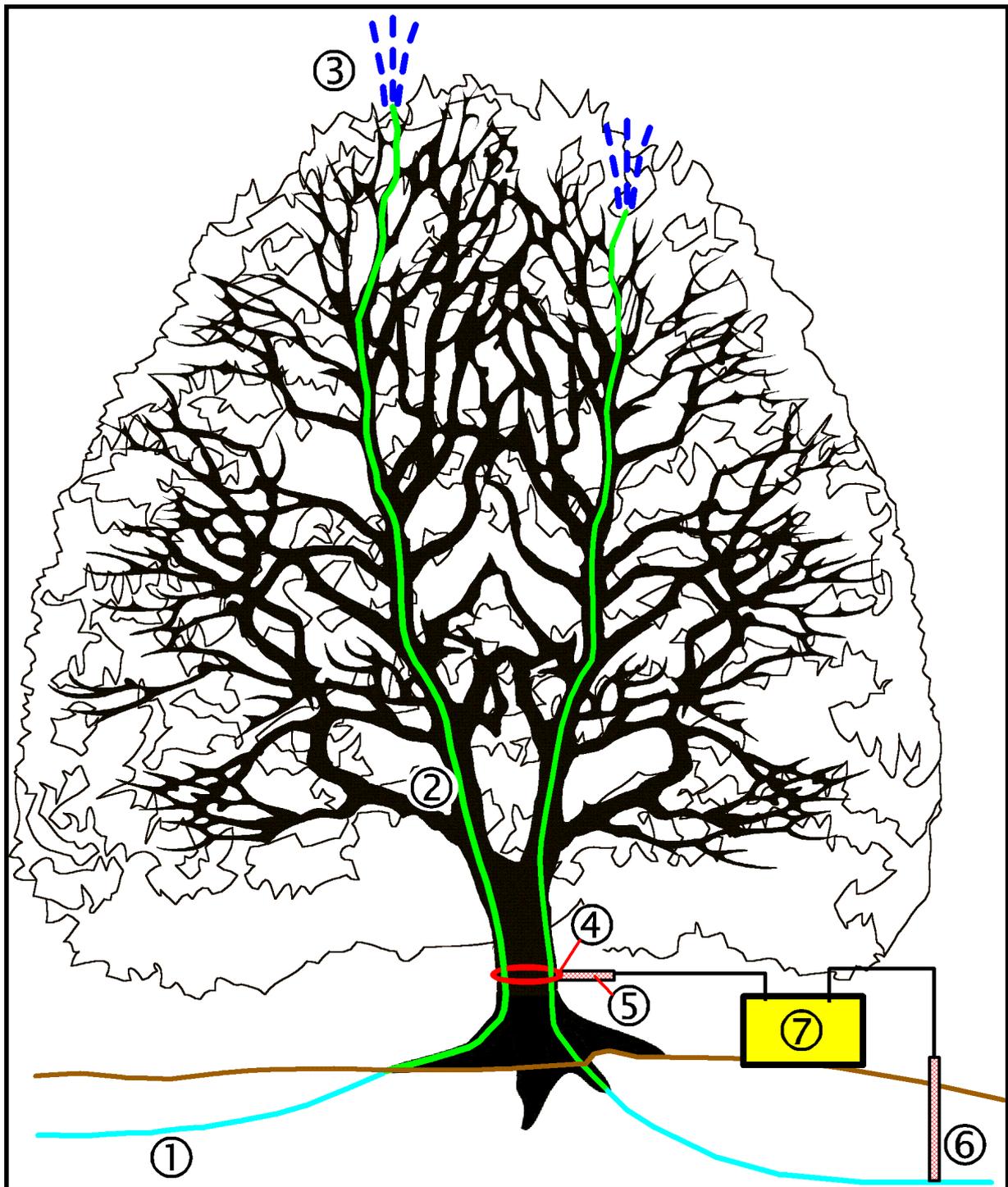
Strömungs- und Diffusionspotentiale entstehen - besonders in morphologisch stark gegliederten, trockenen Gebieten - auch dann, wenn Regenwasser versickert und bis zum Grundwasser vordringt oder wenn Bodenfeuchtigkeit infolge von Kapillarwirkung und Verdunstung rasch aufsteigt. In diesen Fälle entsteht ein *temporäres geoelektrisches Störpotential*, das nach Abschluss der Versickerung bzw. der Verdunstung wieder verschwindet. Im allgemeinen ist das damit verbundene Potentialgefälle bei absteigender Wasserbewegung negativ und bei aufsteigendem Wasserstrom positiv. Solche temporären geoelektrischen Störpotentiale sind im Gegensatz zu den quasistatischen Potentialen der Reduktion und Oxidation von Erzmineraleien bzw. der regionalen Grundwasserströmungen zeitlich stark veränderlich.

### 3. Bioelektrische Potentiale

Als bioelektrisches Potential bezeichnet man an biologischen Strukturen auftretende elektrische Potentiale.

Bioelektrische Potentiale wurden bisher nur an Tieren und Menschen untersucht und haben aus physikalischer Sicht die gleichen Entstehungsmechanismen wie die zuvor betrachteten Geopotentiale.

Von besonderer Bedeutung ist das Membranpotential der lebenden Zelle, das gegenüber der Umgebung negativ ist und einen charakteristischen Basiswert von 50 bis 90 mV besitzt [02] (Ruhepotential). Es wird von allen Zellen zur Steuerung der metabolischen Prozesse genutzt und kann darüber hinaus von spezialisierten Zellen (z.B. Nerven und Muskelzellen) durch temporäre Veränderung der Permeabilität der Zellmembran impulsartig verändert werden, wobei das resultierende Aktionspotential der Zelle meist positiv gegenüber der Umgebung ist (Depolarisation). Durch diese Potentialänderung entstehen elektrische Signale, die sich längs der Nervenfasern ausbreiten, Muskeln kontrahieren usw.



**Abbildung 1: Messprinzip für die Langzeitregistrierung der bioelektrischen Potentialvariationen eines Baums.**

Erläuterungen: 1 - Elektrolytströmung in Bodenkapillaren, 2 - Elektrolytströmung im Xylem, 3 - Evapotranspiration, 4 - Bioelektrisches Strömungspotential an der Oberfläche des Xylems, 5 - Platinsonde an der Oberfläche des Xylems, 6 - Unpolarisierbare Bodensonde, 7 - Meßcomputer zur Messung der elektrischen Spannung zwischen 5 und 6.

Bei einigen Fischen haben sich zur Selbstverteidigung und zur Jagd besondere elektrische Organe entwickelt, in denen die elektrischen Impulse Spannungen bis 1000 V erreichen. Abgesehen von diesem, durch Zusammenwirken vieler Zellen verursachten Extremwert, liegt die Größenordnung der bioelektrischen Aktionspotentiale in einem Abstand von den er-

zeugenden Zellen bei 20 bis 30  $\mu\text{V}$  (EEG beim Menschen) bzw. etwa ebenso vielen mV (EKG beim Menschen). In zerstörtem Gewebe können Spannungen bis 50 mV auftreten [03].

Bei Pflanzen, deren Lebensprozesse langsamer ablaufen, sind vergleichbare kurzperiodische Aktionspotentialänderungen nicht zu beobachten. Aber, zumindest bei großen Pflanzen, die über lange, kapillare und mit Wasser gefüllte Röhrensysteme verfügen, kann vermutet werden, dass die rhythmische Änderung der physikalischen Einflussfaktoren (z.B. Licht, Temperatur u.a.) beim Wechsel von Tag und Nacht synchrone Veränderungen eines Strömungspotentials verursachen.

Wasser, das infolge der aus dem Boden aufgenommenen, gelösten Salze Anionen und Kationen enthält steigt, durch Zusammenwirken von Kohäsion und Tension bis zur Spitze der höchsten Bäume auf (Abbildung 1). Die dazu erforderliche Druckdifferenz (Tension) innerhalb des Xylems wird durch Evapotranspiration in den Blättern erzeugt: Bei hoher Temperatur und niedriger Luftfeuchtigkeit strömt Wasser von den benachbarten Mesophyllzellen zu den Stomata der Blätter, tritt dort auf die Blattoberfläche aus (Transpiration) und verdunstet (Evaporation). Dadurch erniedrigt sich der Wassergehalt der Mesophyllzellen und zur Aufrechterhaltung des Stoffwechsels muss Wasser vom Xylem durch Osmose in die Blätter gelangen um das Defizit auszugleichen. Infolge der starken Kohäsion des Wassers und unterstützt durch die Adhäsion an den Rändern der Xylemröhren steigt die gesamte Wassersäule entsprechend auf, überträgt dabei die entstandene Druckdifferenz auf das untere Ende des Xylems und pumpt dort neues Wasser aus den Bodenporen durch die Rhizodermis. In den, der Wurzel unmittelbar benachbarten Bodenporen entsteht dadurch ebenfalls ein Unterdruck, der seinerseits bewirkt, dass Wasser aus entfernteren Bereichen herbeifließt, gegebenenfalls sogar aus dem tiefer liegenden Grundwasserspiegel aufsteigt.

Dieser, sicher häufig mehrere Stunden quasistationär verlaufende Prozess des kapillaren Wasseraufstiegs in der Pflanze ist demnach - wiederum physikalisch betrachtet - die unmittelbare Fortsetzung der Strömung des Bodenwassers mit seinen elektrischen Ladungsträgern in die Pflanze hinein. An der Oberfläche der Pflanze muss demnach ebenso ein elektrisches Strömungspotential auftreten wie das an der Erdoberfläche zu beobachtende bioelektrische "Störpotential" geoelektrischer Eigenpotentialmessungen in der Umgebung der betreffenden Pflanze, wobei eine Spannung entsprechend Gleichung (3) auftritt; mit dem Unterschied, dass die Materialkennziffer  $f$  an Stelle der Kapillargeometrie der Bodenporen diejenige des Xylems charakterisiert.

Auf Grund der tageszeitlichen Variation der Evapotranspiration der Vegetation ist zu erwarten, dass das bioelektrische Strömungspotential entsprechende periodische bzw. rhythmische Veränderungen aufweist. Zum Nachweis und zur genaueren Untersuchung solcher Biopotentialvariationen wurden die im folgenden beschriebenen Untersuchungen durchgeführt.

#### **4. Messtechnische Erfassung der Variationen des bioelektrischen Potentials von Bäumen**

Wenn Ladungsträger durch die Xylemröhren eines Baumes aufwärts strömen, so entspricht das nach dem Kontinuitätsgesetz einem elektrischen Stromfluss mit dem Stromdichtefeld

$$\operatorname{div} \vec{j} = \frac{dQ}{dt} \quad (5)$$

wobei

$$\|\vec{j}\| = \frac{I}{F} \quad (6)$$

mit:  $I$  = Stromstärke,  $F$  = Fläche und  $Q$  = Ladung.

Das Stromdichtefeld verursacht seinerseits an der Oberfläche des Xylems das bioelektrische Potentialfeld, für das nach dem Ohm'schen Gesetz gilt

$$\vec{E} = \rho \vec{j} \quad (7)$$

Darin ist  $\rho$  der spezifische elektrische Widerstand des Elektrolyts, der wiederum von der Konzentration der gelösten Salze und von der Temperatur abhängt.

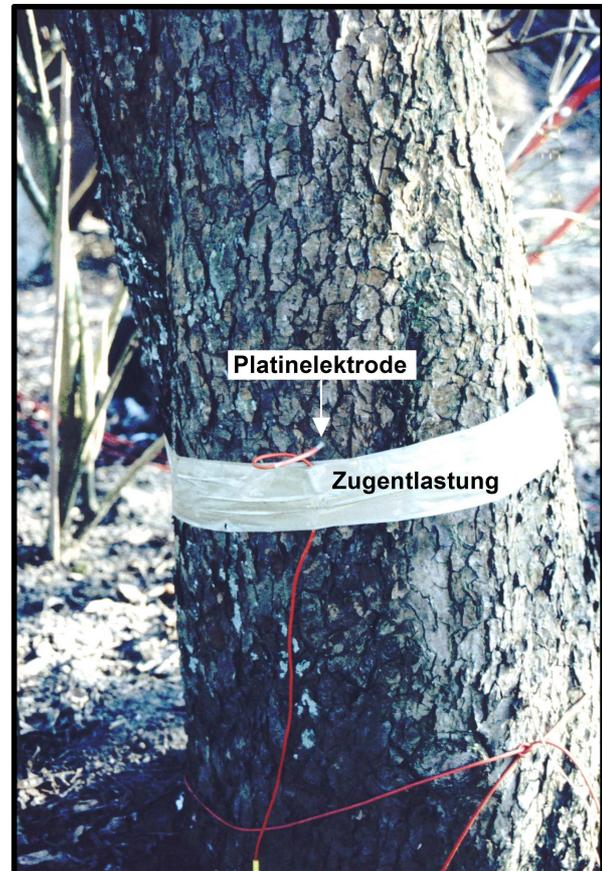
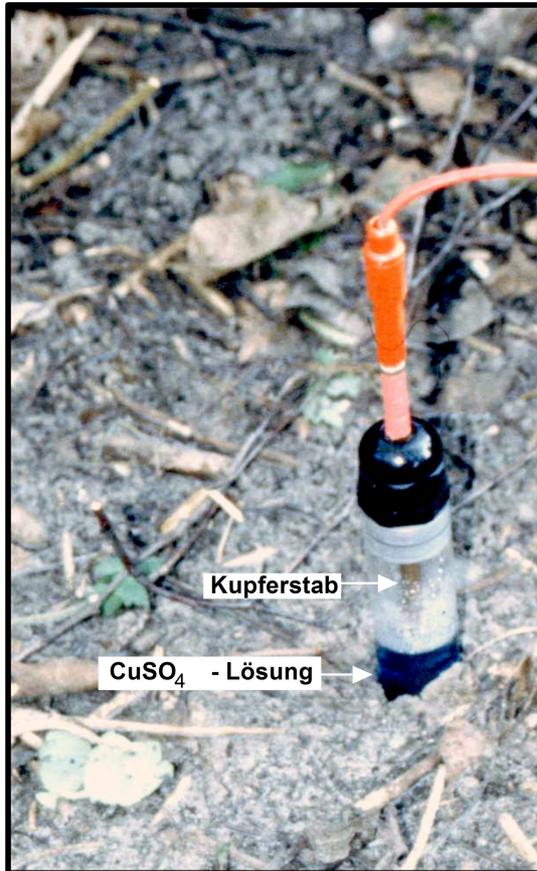
Die Feldstärke des bioelektrischen Potentials an einem bestimmten Punkt an der Xylemoberfläche kann prinzipiell durch Messung der elektrischen Spannung  $U$  zwischen diesem Punkt und einem zweiten Punkt, der genügend weit entfernt ist, erfolgen. In der Praxis ist das jedoch aus folgenden Gründen mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden:

- Die Potentialsonden müssen so beschaffen sein, dass sie weder das Untersuchungsobjekt noch die zu messende Spannung beeinflussen. Insbesondere müssen beide Sonden unpolarisierbar sein, d.h. an ihrem Kontakt zum Baum bzw. zum Boden dürfen keine chemischen oder physikalischen Prozesse ablaufen, die selbst eine elektrische Spannung erzeugen.
- Die Spannungsmessung kann nur im Nebenschluss zur Quelle erfolgen (Abbildung 1). Wenn der Widerstand der Spannungsmesseinrichtung nicht außerordentlich groß ist, fließen die Ladungen über die Messeinrichtung ab und das bioelektrische Potential wird verfälscht oder sogar völlig abgebaut. Bei dem erforderlichen sehr hohen inneren Widerstand der Messeinrichtung können sich aber zwischen den beiden Messsonden zusätzliche Spannungen aus anderen Quellen (z.B. Luftpolarisierbarkeit) aufbauen, die das Messergebnis verfälschen.
- Die Bodensonde (Nr. 6 in Abbildung 1), die als Bezugspunkt für die Spannungsmessung benötigt wird, ist kein unveränderlicher, absoluter Nullpunkt für das bioelektrische Potential, weil sie sich im Einflussbereich des geoelektrischen Bodenpotentials befindet. Zeitliche Veränderungen des geoelektrischen Bodenpotentials, z.B. infolge der Versickerung von Niederschlägen führen zu einer Veränderung der elektrischen Spannung im Messkreis, ohne dass unterschieden werden kann, welches Potential dafür verantwortlich ist.
- Veränderungen des Ionengehaltes (z.B. durch Düngung oder durch Niederschläge) und Temperaturänderungen beeinflussen den spezifischen Widerstand  $\rho$  des Elektrolyts und bewirken nach Gleichung 7 ebenfalls Veränderungen des Potentials, die Variationen des Stromdichtefeldes im Xylem infolge biologischer Prozesse vortäuschen können. Andererseits können z.B. im Tagesrhythmus schwankende Temperaturen zwar - auf rein physikalischem Wege - synchrone Potentialvariationen verursachen, ohne den biologisch gesteuerten Prozess des Elektrolytaufstiegs im Xylem würde aber überhaupt keine Potentialdifferenz zum Boden auftreten.

Unter Berücksichtigung dieser Probleme wurde eine elektronische Apparatur entwickelt, die die Messung bioelektrischer Potentiale an mehreren Messstellen über einen längeren Zeitraum ermöglicht. Sie wurde in Form von zwei verschiedenen Prototypen mit den Bezeichnungen BIPOM-1 und BIPOM-2 aufgebaut. Während der Versuchsaufbau BIPOM-1 noch mit einem netzabhängigen Computer verbunden ist, wurde BIPOM-2 als batteriebetriebener Messcomputer gestaltet, der eine 14-tägige autonome Arbeit im Gelände gewährleistet. BIPOM-1 wurde inzwischen bereits über einen Zeitraum von 10 Monaten praktisch erprobt, wobei umfangreiches Datenmaterial von drei verschiedenen Bäumen erfasst wurde. Die Entwicklung von BIPOM-2 befindet sich z.Zt. noch im Stadium der Kalibrierung und Funktionsprüfung.

Der Messprozess wird durch folgende technischen Einzelheiten charakterisiert: Als unpolarisierbare Bodensonde (Abbildung 2) wird ein Rohr verwendet, das mit gesättigter  $\text{CuSO}_4$  - Lösung gefüllt wird. Es ist an seinem unteren Ende porös, so dass ein Austausch elektrischer Ladungsträger mit dem Porenwasser der umgebenden Bodenfeuchtigkeit erfolgen

kann. In die Lösung taucht ein, am oberen Rohrende befestigter Kupferstab ein, an dem das Bodenpotential abgegriffen und mit einem Kabel an ein Messgerät geleitet werden kann, ohne dass an der Kontaktstelle zwischen Boden und Sonde ein Nernst'sches Potential entsteht. Die Bodensonde kann in beliebig großem Abstand zu den zu untersuchenden Pflanzen aufgestellt werden, so dass deren Beeinflussung durch das Schwermetall Kupfer vermieden werden kann.

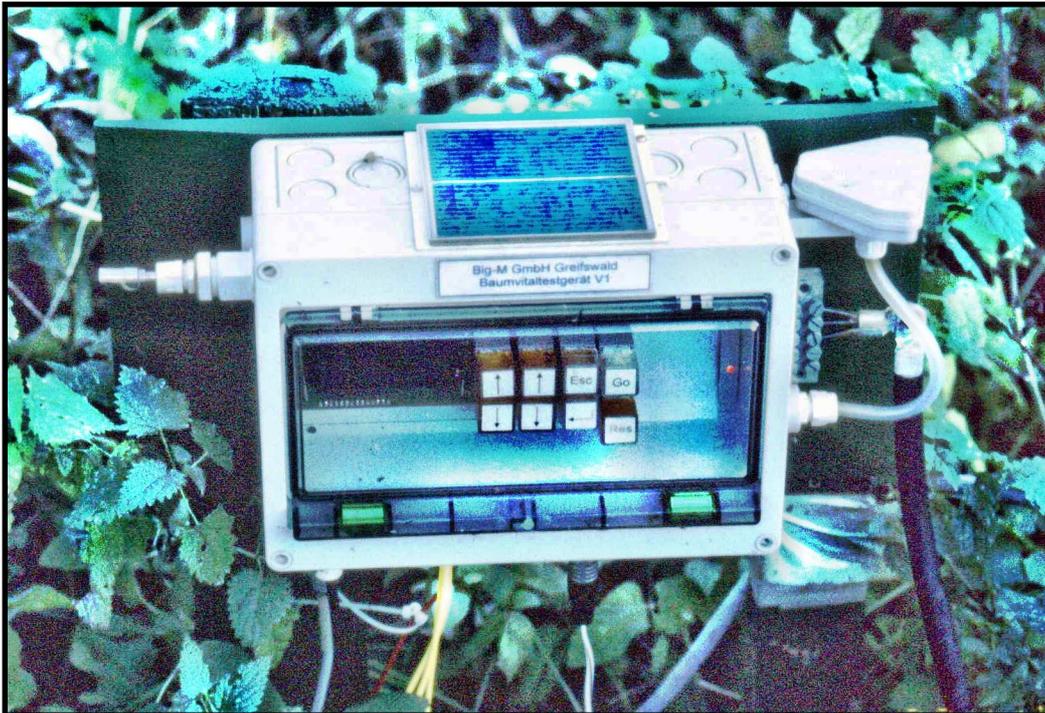


**Abbildung 2: Unpolarisierbare Bodensonde**

**Abbildung 3: Baumsonde**

Das, an der Oberfläche des Xylems vorhandene Biopotential wird mit dünnen Platindrähtchen abgegriffen, die durch Bohrungen in der Baumrinde geführt werden (Abbildung 3). Insgesamt werden drei (BIPOM-1) bzw. vier (BIPOM-2) derartige Baumsonden aus Platin zur gleichzeitigen Messung des Biopotentials an drei bzw. vier Messstellen verwendet. An der Außenseite der Sonde wird jeweils ein Kabel für die Übertragung des Potentials zum Messgerät angebracht. Die Kabel werden zur Zugentlastung der Sonde mit Klebstreifen an der Baumoberfläche befestigt (Abbildung 3).

Die Messung der Potentialdifferenzen, d.h. der elektrischen Spannungen zwischen der Bodensonde und den Baumpotentialsonden erfolgt mit mikroprozessorgesteuerten Messgeräten (Abbildung 4). Dabei wird das Potential der Bodensonde über eine Impedanzanpassungsstufe mit einem Eingangswiderstand  $>1 \text{ G}\Omega$ , parallel an die Eingänge A von drei (BIPOM-1) bzw. vier (BIPOM-2) Differenzverstärkern angelegt. An die Eingänge B der Differenzverstärker, die jeweils einen Eingangswiderstand  $10 \text{ M}\Omega$  besitzen, gelangen - nach einer Tiefpassfilterung mit einer Grenzfrequenz von  $1 \text{ Hz}$  - die Signale der drei bzw. vier Baumsonden. Mit den Differenzverstärkern, deren Verstärkungsfaktor 2 beträgt erfolgt die Pegelanpassung an den Eingangsspannungsbereich der nachfolgenden Wandler, der zwischen  $0$  und  $-2,5 \text{ V}$  liegt und mit denen die Potentialdifferenzen mit einer Verarbeitungsbreite von 10 Bit digitalisiert werden. Danach werden die Messergebnisse gespeichert.



**Abbildung 4: Biopotential-Messcomputer BIPOM-1**

Bei jeder Messung wird die Uhrzeit (Stunde, Minute) registriert und zusätzlich zu den elektrischen Potentialdifferenzen werden die zur Zeit der Messung vorhandene Beleuchtungsstärke ( $W/m^2$ ), die Lufttemperatur ( $^{\circ}C$ ), die relative Luftfeuchtigkeit (%), die seit der letzten Messung gefallene Niederschlagsmenge (mm) und (nur mit BIPOM-2) der Luftdruck (mBar) erfasst und in digitaler Form gespeichert. Das erfolgt ebenfalls mit einer Verarbeitungsbreite von 10 Bit.

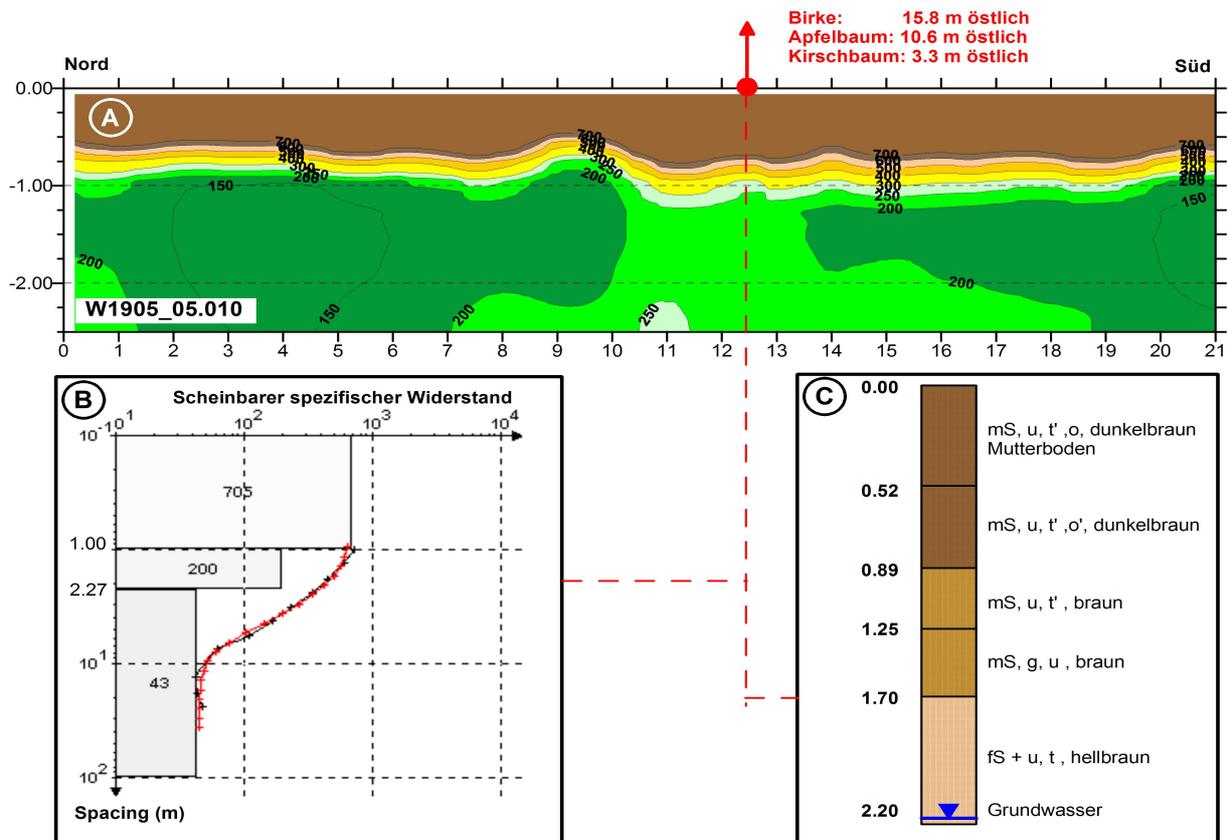
Die Zykluszeit ist softwaremäßig einstellbar. Bei den bisherigen Versuchsmessungen wurde eine Zykluszeit von 1 min eingestellt, mit der demnach 1440 Datensätze je Messtag registriert werden.

## **5. Standort und Versuchsobjekte**

Mit dem Messcomputer BIPOM-1 wurden im Zeitraum vom 19.04.2000 bis 26.02.2001 an drei Bäumen umfangreiche Versuchsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden beschrieben werden. Die Versuchsmessungen wurden an drei Bäumen durchgeführt, die sich in einem Hausgarten in Weitenhagen, ca. 5 km südlich von Greifswald befinden.

Der Standort ist hinsichtlich des Bodenprofils durch sandige Nachschüttungen der Weichsel-Eiszeit charakterisiert (Abbildung 5C), die hinsichtlich ihres spezifischen elektrischen Widerstandes als drei unterschiedliche geoelektrische Schichten in Erscheinung treten (Abbildung 5B). Die bis 1.00 m hinabreichende oberste Schicht ist relativ trocken und besitzt deshalb einen spezifischen Widerstand von  $705 \Omega m$ . Unterhalb des Grundwasserspiegels, d.h. ab ca. 2.20 unter der Geländeoberfläche hat das tonige Feinsand - Schluff - Gemisch nur noch einen spezifischen Widerstand von  $43 \Omega m$ . Dazwischen befindet sich eine Übergangsschicht mit einem spezifischen Widerstand von  $200 \Omega m$ . Nach dem, mit der Methodik der geoelektrischen Computertomographie ermittelten Kartierungsergebnis sind diese Bedingungen im Umkreis von  $\pm 10$  m um die Versuchsobjekte weitgehend homogen (Abbildung 5A). Der Standort besitzt demnach ein reichhaltiges Wasserangebot für das Wachstum der Bäume. Ab 1 m Tiefe enthält der Boden ganzjährig pflanzenverfügbares Wasser. Niederschläge ver-

sickern in den porösen Mittelsanden schnell bis zum Grundwasserniveau, so dass Strömungspotentiale wenige Stunden danach abgebaut sind.



**Abbildung 5: Geologisch - geophysikalische Standortbedingungen der Versuchsobjekte**  
**A - Vertikalschnitt des spezifischen elektrischen Widerstandes bis 2.5 m Tiefe**  
**B - Geoelektrische Widerstandssondierung bis 24 m Wirkungstiefe**  
**C - Geologisches Profil der Rammkernsondierung (Bezeichn. n. DIN 4023)**  
**Die Position von B und C auf dem Vertikalschnitt A kennzeichnet der rote Punkt**

Als Versuchsobjekte wurden drei Bäume ausgewählt, die sich auf einer senkrecht zu dem in Abbildung 5A dargestellten geoelektrischen Vertikalschnitt verlaufenden Linie befinden und von dem roten Punkt in Abbildung 5A 3.3.m (Objekt 1), 10.6 m (Objekt 2) und 15.8 m (Objekt 3) östlich liegen.

Versuchsobjekt 1 war ein 5.80 m hoher, 9 Jahre alter Kirschbaum mit einem Stammdurchmesser von ca. 16 cm (Abbildung 6). Versuchsobjekt 2 war ein 8.60 m hoher, über 30 Jahre alter Apfelbaum mit einem Stammdurchmesser von ca. 37 cm (Abbildung 7). Versuchsobjekt 3 war eine 15.30 m hohe, ebenfalls über 30 Jahre alte Birke mit einem Stammdurchmesser von ca. 40 cm (Abbildung 8). Die Durchmesserangaben beziehen sich auf eine Höhe von 0.50 m über der Geländeoberfläche, in der auch die Biopotentialsonden angebracht wurden.



**Abbildung 6: Kirschbaum**



**Abbildung 7: Apfelbaum**

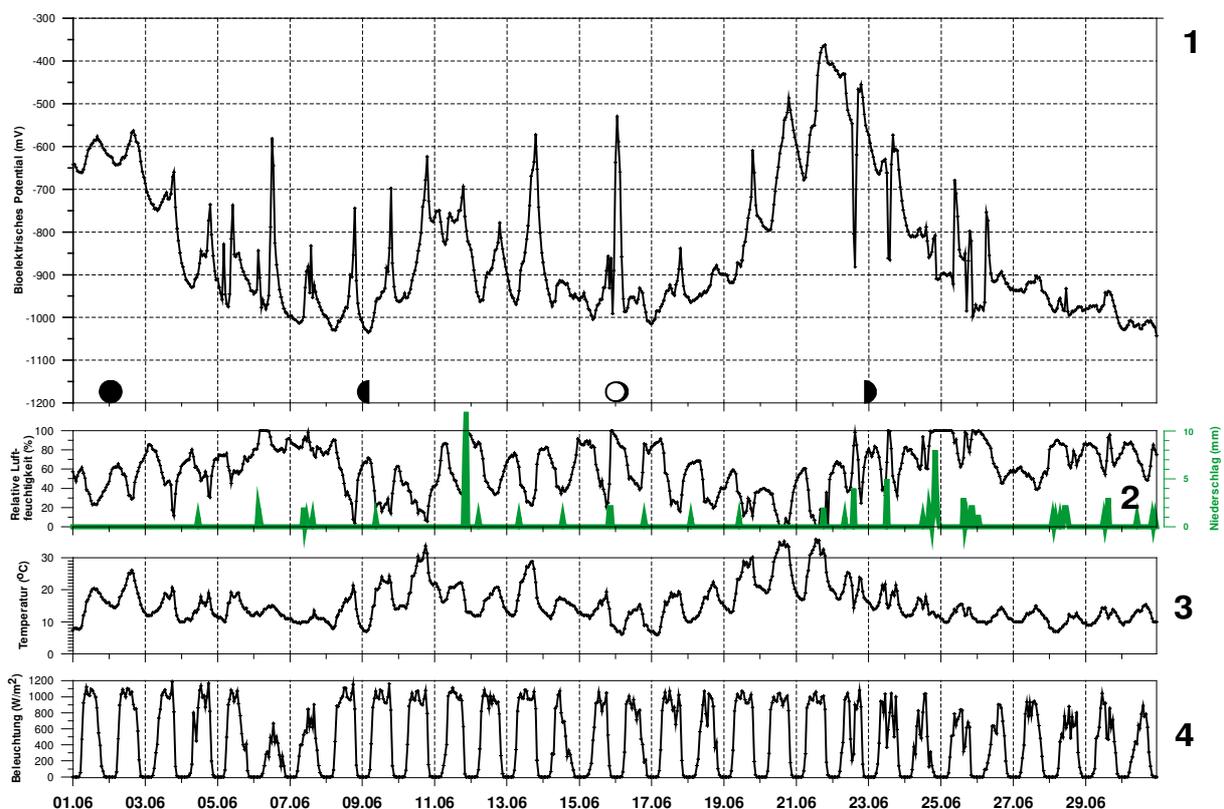


**Abbildung 8: Birke**

Die Erfassung und Speicherung der Messwerte mit dem Messcomputer BIPOM-1 erfolgte jeweils im Abstand von 1 Minute. Erste Auswertungen zeigten bereits, dass die zeitlichen Variationen des bioelektrischen Potentials und auch der anderen Messgrößen viel langsamer vor sich gehen, so dass - auch zur Verbesserung der Übersichtlichkeit - eine Datenreduktion durch Berechnung der Stundenmittelwerte vorgenommen werden konnte.

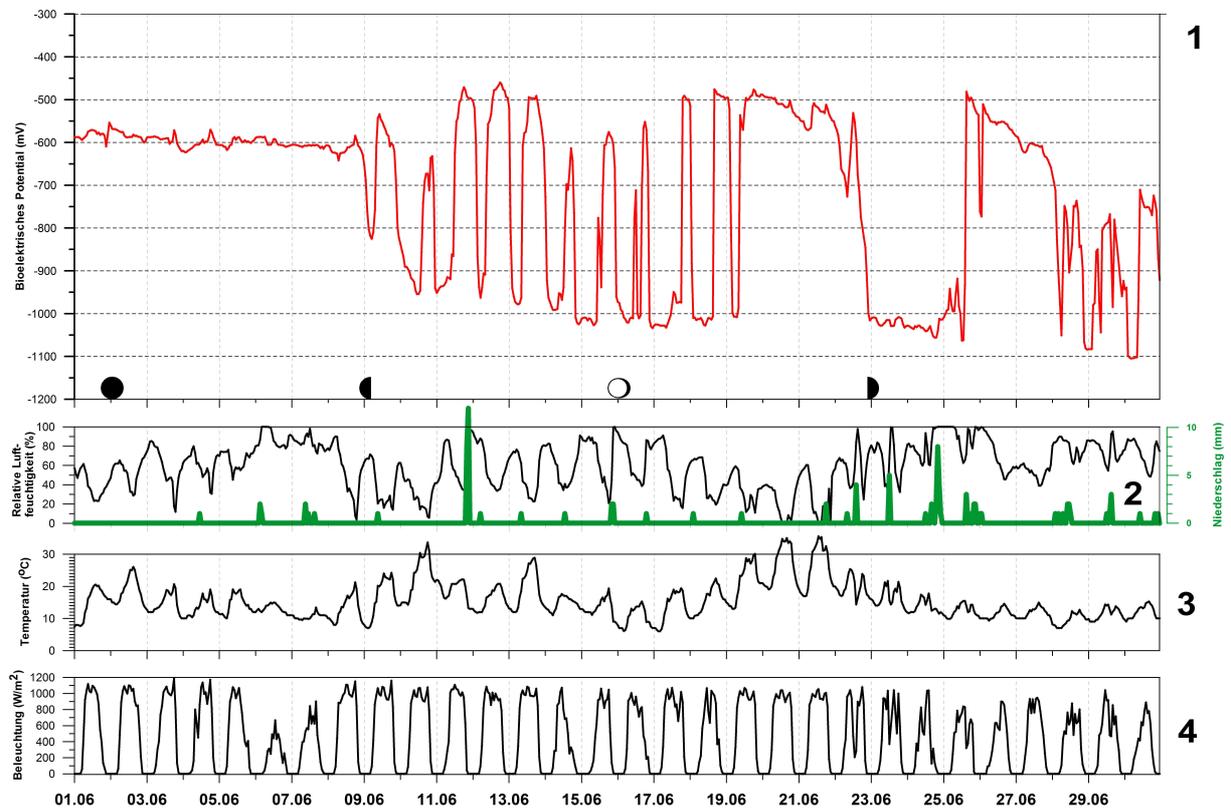
Der Verlauf der Stundenmittelwerte wurde für den gesamten Versuchszeitraum graphisch veranschaulicht. Die Abbildungen 9 bis 11 und 12 bis 14 zeigen beispielhaft Ausschnitte aus diesen Verlaufskurven für die Monate Juni und November 2000. Weil in der Forstwirtschaft mitunter angenommen wird, dass bei einer bestimmten, als "günstig" angesehenen Mondphase geerntetes Holz eine Reihe außergewöhnlicher Holzeigenschaften besitzen soll [04] wurden auch die Mondphasen [05] in die Diagramme eingetragen.

Alle Darstellungen lassen zunächst die regelmäßigen Veränderungen der physikalischen Umweltbedingungen Beleuchtungsstärke, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit erkennen, die als periodisches Grundmuster einen 24-Stunden Rhythmus aufweisen.

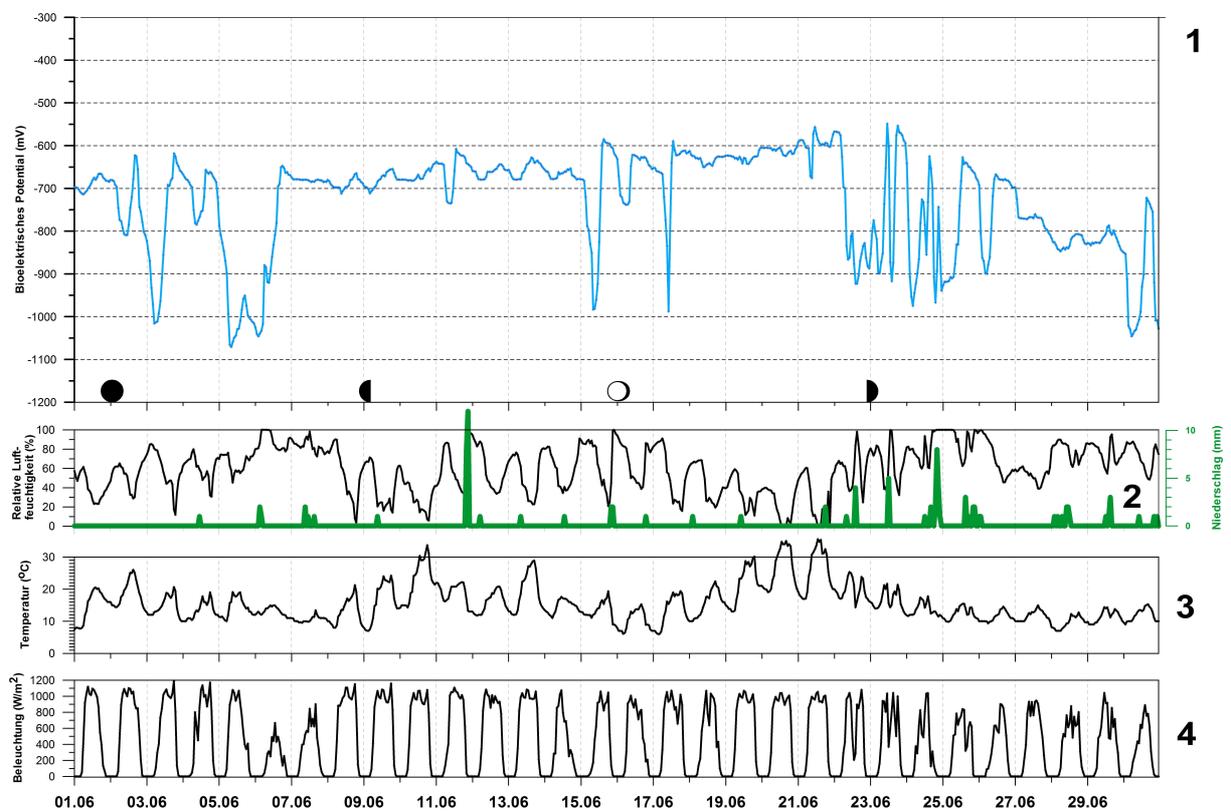


**Abbildung 9: Stundenmittelwerte des bioelektrischen Potentials des Kirschbaums (1), der relativen Luftfeuchtigkeit (2, schwarz), der Niederschlagsmenge (2, grün), der Lufttemperatur (3) und der Beleuchtungsstärke (4) im Zeitraum vom 01. bis 30. Juni 2000.**

Dieser Rhythmus ist durch längerperiodische, jahreszeitliche und witterungsbedingte Veränderungen überlagert, die z.B. in den Unterschieden der Temperatur- und Feuchtigkeitsamplituden in den ausgewählten Monaten oder in den langsamen Temperaturanstiegen und Feuchtigkeitsabnahmen der Schönwetterperioden vom 08. bis 11. und vom 16. bis 22. Juni zum Ausdruck kommen. Aber auch kurzzeitige, unregelmäßig auftretende Ereignisse stören diesen Rhythmus, wie z.B. die durch sehr starke Bewölkung am 06. Juni verursachte Verminderung der Beleuchtungsstärke, die mit einer verminderten Tagesamplitude von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit einhergeht.

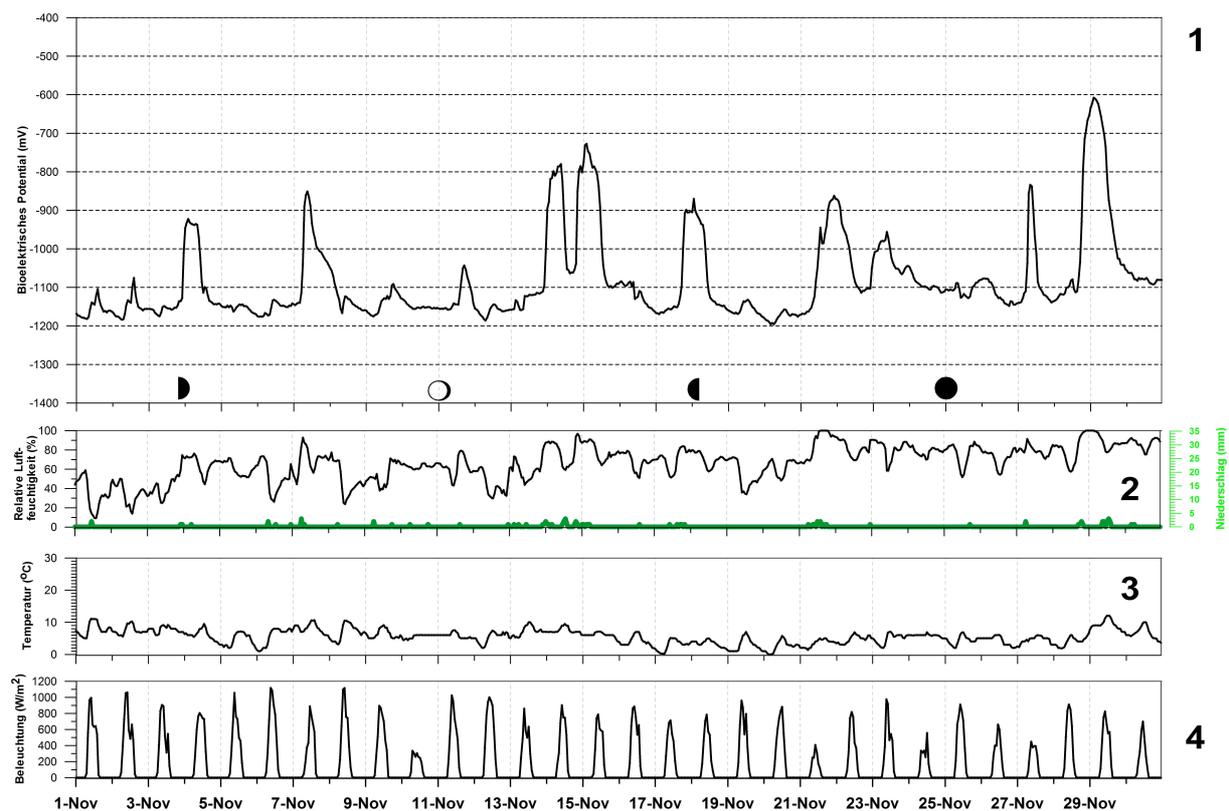


**Abbildung 10: Stundenmittelwerte des bioelektrischen Potentials des Apfelbaums (1), der relativen Luftfeuchtigkeit (2, schwarz), der Niederschlagsmenge (2, grün), der Lufttemperatur (3) und der Beleuchtungsstärke (4) im Zeitraum vom 01. bis 30. Juni 2000.**

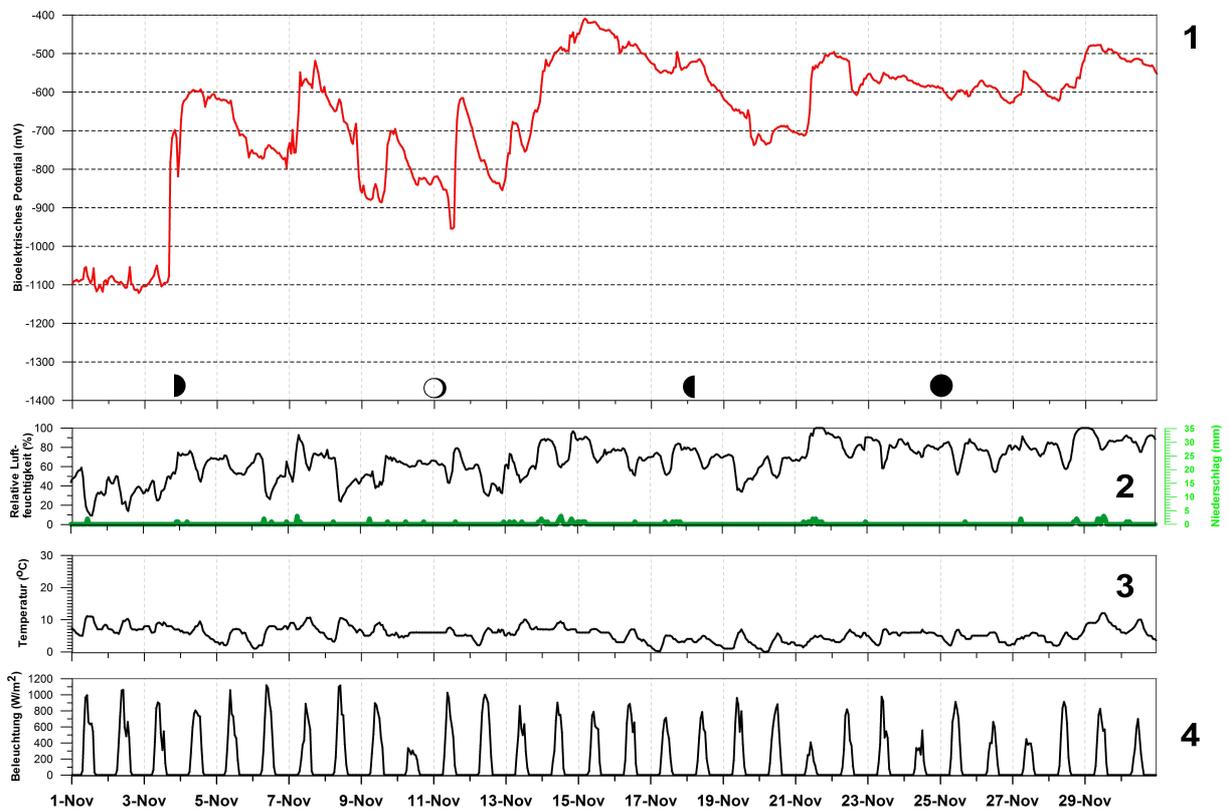


**Abbildung 11: Stundenmittelwerte des bioelektrischen Potentials der Birke (1), der relativen Luftfeuchtigkeit (2, schwarz), der Niederschlagsmenge (2, grün), der Lufttemperatur (3) und der Beleuchtungsstärke (4) im Zeitraum vom 01. bis 30. Juni 2000.**

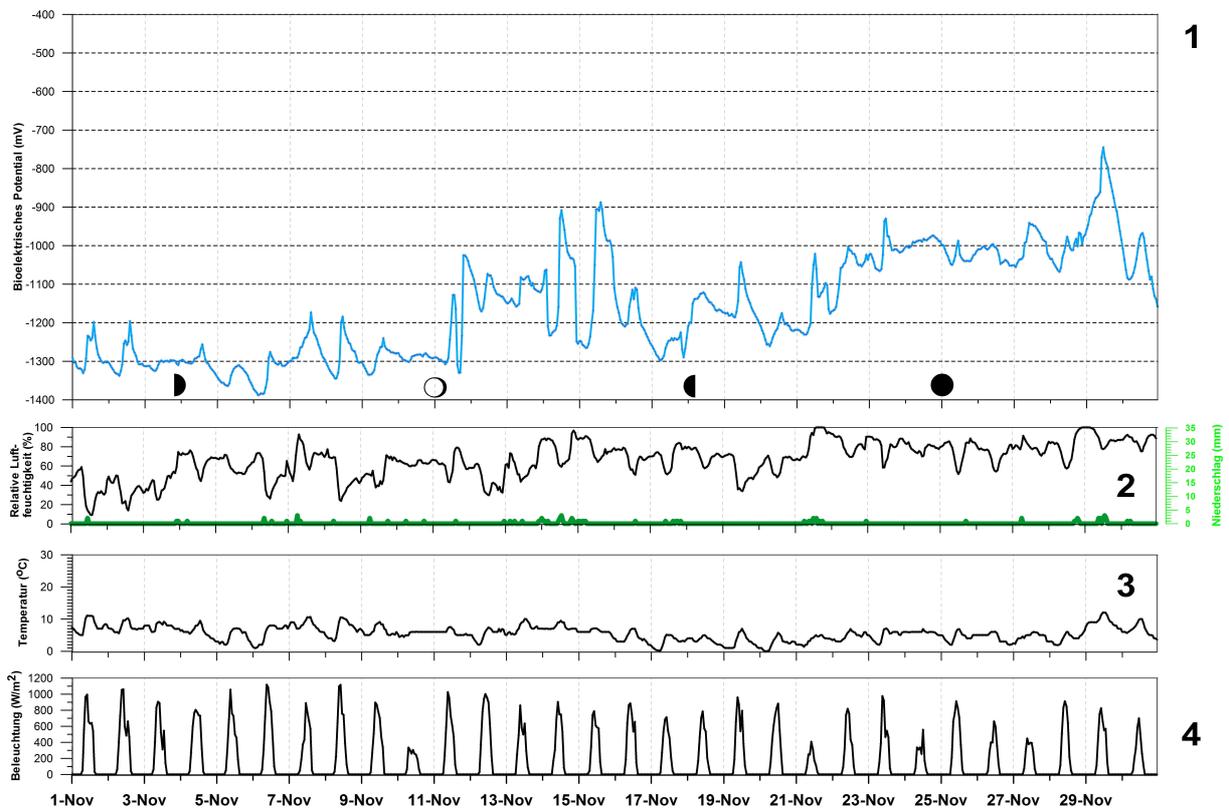
Die visuelle Beurteilung des Verlaufs der bioelektrischen Potentiale lässt eine prinzipiell ähnliche Charakteristik erkennen. Die Kurven besitzen - zumindest abschnittsweise - eine ausgeprägte Tagesperiode, deren Amplitude im Juni deutlich größer war, als im November. Andererseits treten häufig mehrtägige Zeiträume auf, in denen nur unbedeutende Potentialveränderungen beobachtet wurden, wie z.B. bei Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum) vom 01. bis 08. Juni (rote Kurve in Abbildung 9). Eine tendenzielle Übereinstimmung des Verlaufs der Biopotentialkurven tritt zwar in bestimmten Zeitabschnitten (z.B. vom 11. bis 15. Juni) oder an bestimmten einzelnen Tagen (z.B. am 07. und am 20. November) auf, kann aber nicht generell festgestellt werden. Die zeitlichen Variationen der bioelektrischen Potentiale werden offensichtlich durch mehrere Faktoren bestimmt, unter den sowohl periodisch deterministische als auch zufällige Einflussgrößen, darunter auch technisch bedingte Störungen [06], vorzufinden sind. Eine Beziehung der Verlaufskurven des Biopotentials zum Phasenwechsel des Mondes ist nicht erkennbar.



**Abbildung 12: Stundenmittelwerte des bioelektrischen Potentials des Kirschbaums (1), der relativen Luftfeuchtigkeit (2, schwarz), der Niederschlagsmenge (2, grün), der Lufttemperatur (3) und der Beleuchtungsstärke (4) im Zeitraum vom 01. bis 30. November 2000.**



**Abbildung 13: Stundenmittelwerte des bioelektrischen Potentials des Apfelbaums (1), der relativen Luftfeuchtigkeit (2, schwarz), der Niederschlagsmenge (2, grün), der Lufttemperatur (3) und der Beleuchtungsstärke (4) im Zeitraum vom 01. bis 30. November 2000.**

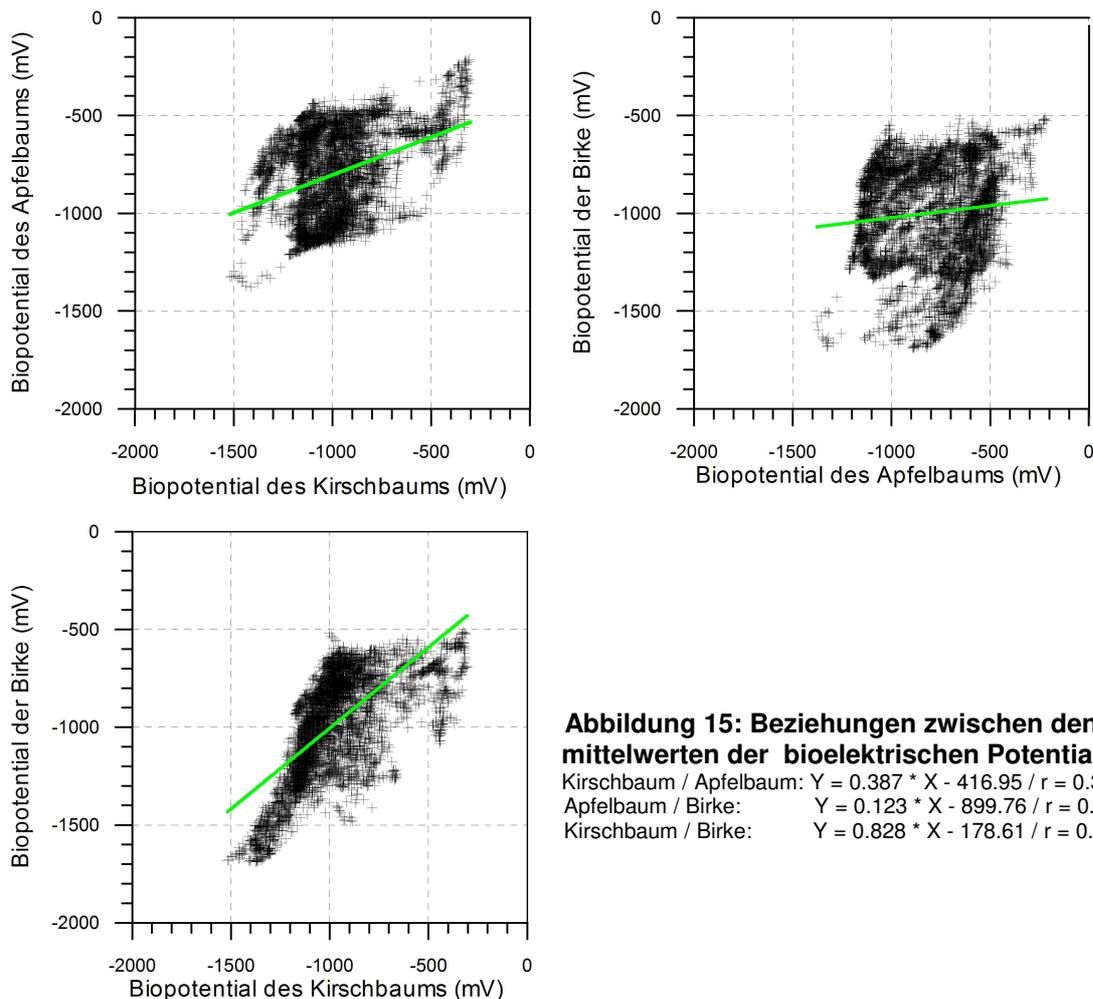


**Abbildung 14: Stundenmittelwerte des bioelektrischen Potentials der Birke (1), der relativen Luftfeuchtigkeit (2, schwarz), der Niederschlagsmenge (2, grün), der Lufttemperatur (3) und der Beleuchtungsstärke (4) im Zeitraum vom 01. bis 30. November 2000.**

## 7. Beziehungen zwischen den Biopotentialvariationen der Untersuchungsobjekte.

Zur weiteren Untersuchung der Frage, welchen Gesetzmäßigkeiten die zeitlichen Veränderungen der bioelektrischen Potentiale folgen und welche Ursachen diese Veränderungen bewirken, wurde eine statistische Analyse des umfangreichen Datenmaterials auf der Grundlage der 6887 Datensätze umfassenden Datei der Stundenmittelwerte vorgenommen.

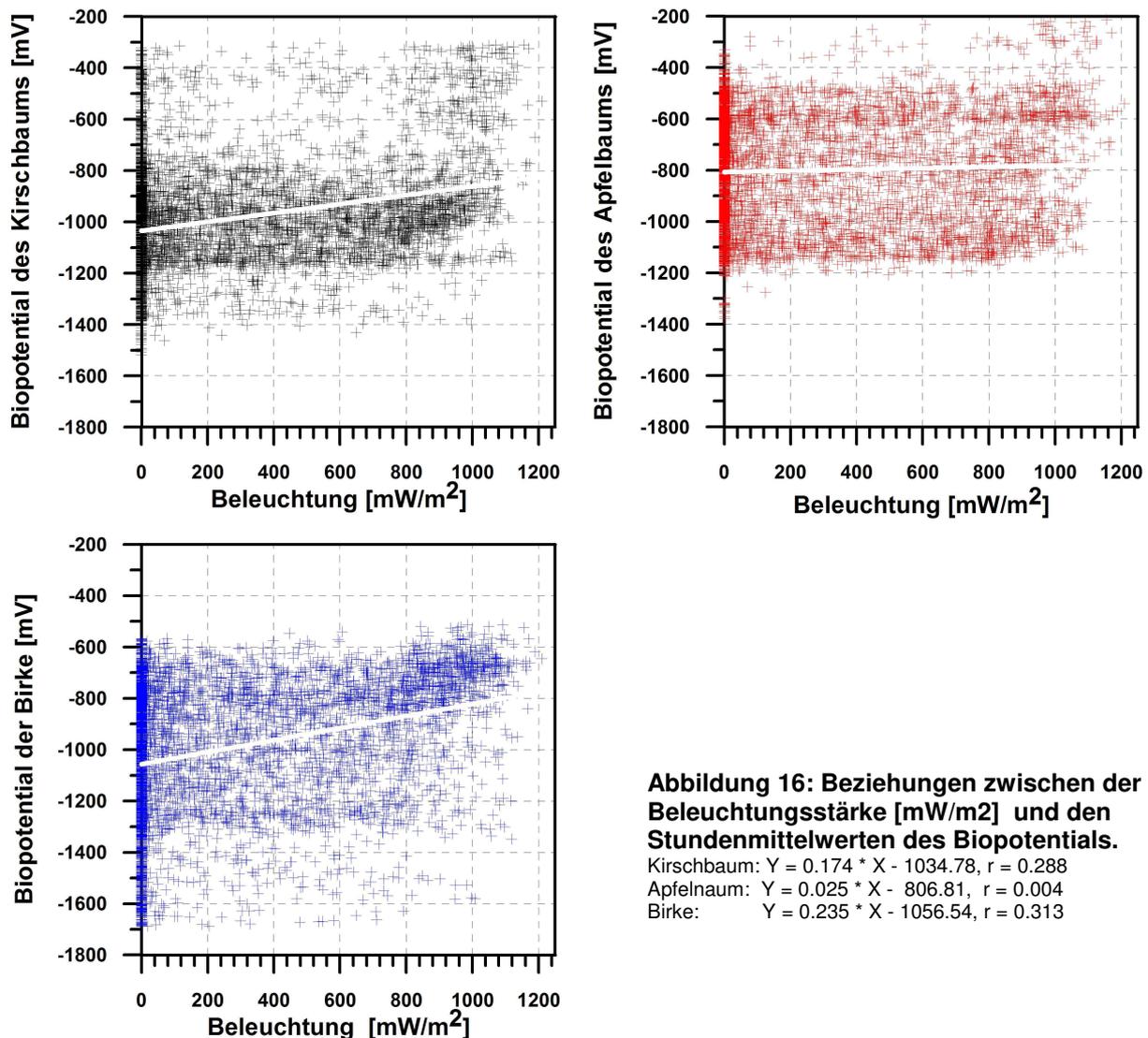
Die bereits oben beschriebenen, visuell erkennbaren gegenseitigen Beziehungen zwischen den bioelektrischen Potentialen der drei Untersuchungsobjekte sind Gegenstand der in Abbildung 15 dargestellten Crossplots. Generell kann zwar eine Proportionalität zwischen den Biopotentialen erkannt werden. Diese ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt und stark störenden Einflüsse unterworfen. Das bedeutet, dass die Umwelteinflüsse auf die Lebensprozesse der Untersuchungsobjekte zu stark voneinander abweichenden Veränderungen des bioelektrischen Potentials führen oder - anders ausgedrückt - die drei ausgewählten Bäume in unterschiedlicher Weise auf diese Umwelteinflüsse reagieren. Während zwischen den bioelektrischen Potentialen der Untersuchungsobjekte 1 (Kirschbaum) und 3 (Birke) visuell sowie im Ergebnis der Regressionsanalyse ein relativ enger statistischer Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.66 erkannt wurde [07], ist dieser Zusammenhang bei den Datenpaaren, an denen das Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum) beteiligt ist, erheblich schwächer. Das bedeutet, dass der über 30 Jahre alte Apfelbaum (Abbildung 7) in anderer Weise auf die physikalischen Umwelteinflüsse reagiert als die anderen beiden Bäume und ist möglicherweise ein erster Hinweis auf seine geringere "Vitalität" im Vergleich zu diesen, wenn man Vitalität als Fähigkeit zur Reaktion auf die Veränderung von Umweltbedingungen versteht.



## 8. Beziehungen zwischen den Variationen der Umweltbedingungen und der Biopotentiale

Mit den weiteren Untersuchungen wurde nun der Frage nachgegangen, welche physikalischen Umwelteinflüsse in welcher Weise die bioelektrischen Potentiale der Untersuchungsobjekte beeinflussen.

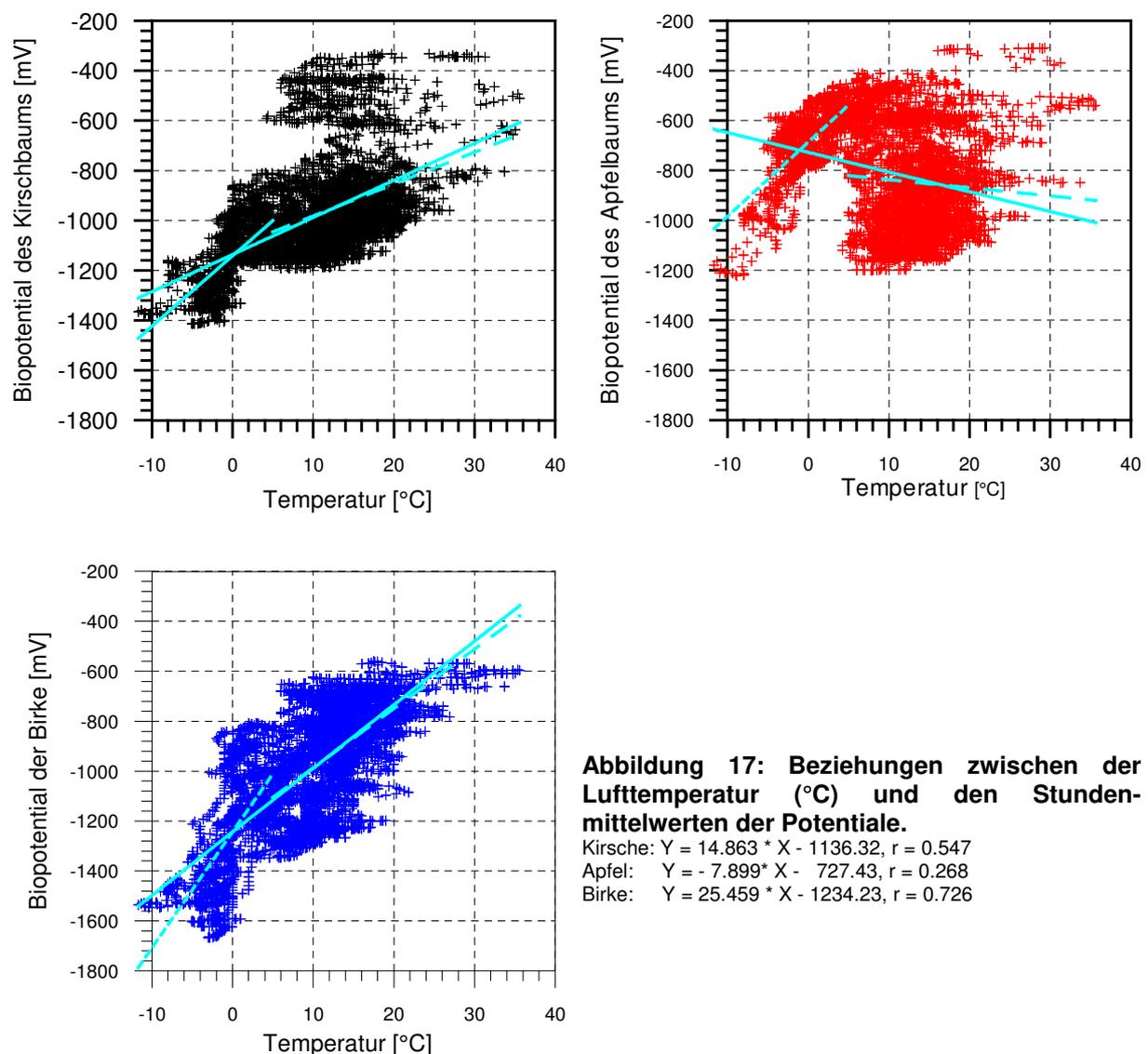
Dabei wurde zunächst der Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und den Biopotentialen untersucht. Das Ergebnis ist in Abbildung 16 dargestellt. Obwohl die Beleuchtungsstärke die am strengsten periodisch variierende Messgröße ist, bestehen insgesamt nur sehr schwache statistische Beziehungen zu den bioelektrischen Potentialen. Die Korrelationskoeffizienten liegen für die Untersuchungsobjekte 1 (Kirschbaum) und 3 (Birke) um 0.3. Wahrscheinlich handelt es sich dabei aber nur um eine Scheinkorrelation, die dadurch zustande kommt, dass die größten Beleuchtungsstärken jeweils zu den Tageszeiten auftreten, in denen auch die höchsten Werte der Lufttemperatur vorhanden sind. Beim Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum) existiert - bei einem Korrelationskoeffizienten von fast Null - nicht einmal diese schwache Scheinkorrelation. Aus diesen Betrachtungen folgt, dass die Beleuchtungsstärke offensichtlich keinen Einfluss auf das Biopotential ausübt, d.h. die Variationen des bioelektrischen Potentials sind kein Indikator für die Intensität des Photosyntheseprozesses.



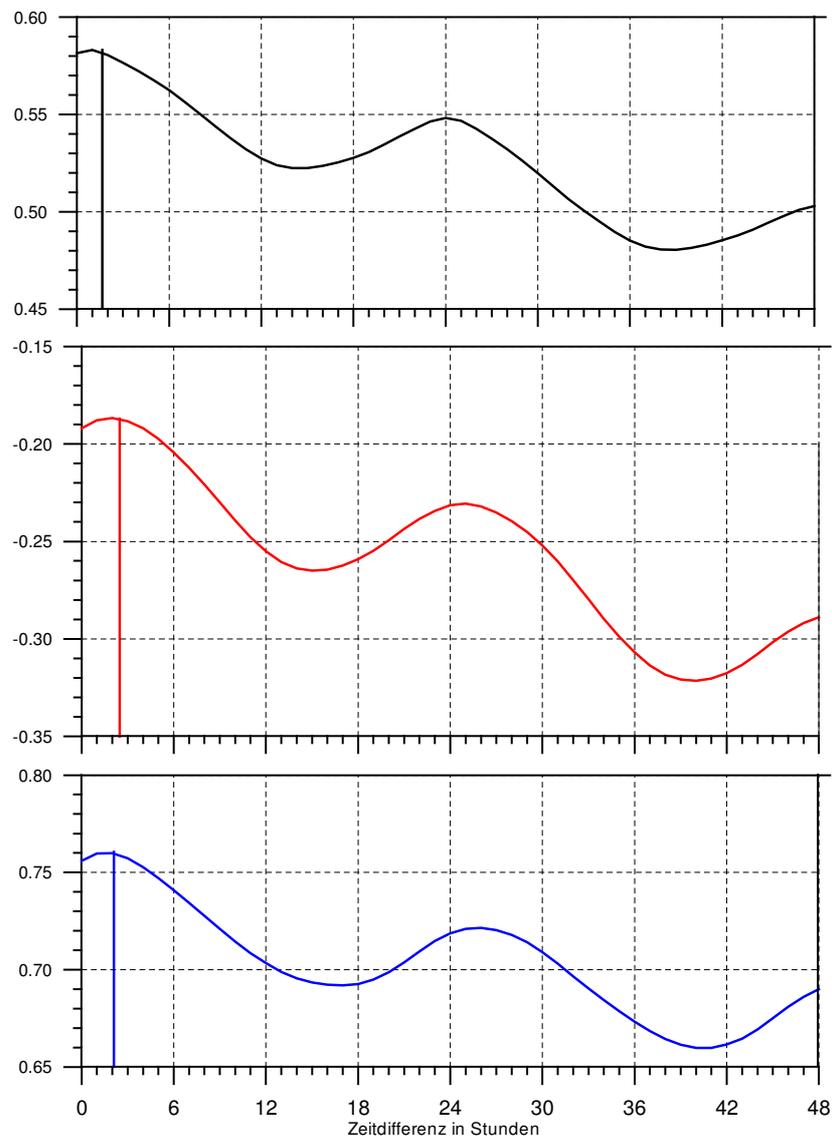
**Abbildung 16: Beziehungen zwischen der Beleuchtungsstärke [mW/m<sup>2</sup>] und den Stundenmittelwerten des Biopotentials.**

Kirschbaum:  $Y = 0.174 * X - 1034.78$ ,  $r = 0.288$   
Apfelbaum:  $Y = 0.025 * X - 806.81$ ,  $r = 0.004$   
Birke:  $Y = 0.235 * X - 1056.54$ ,  $r = 0.313$

Bei der Lufttemperatur wurden dagegen - zumindest für die Untersuchungsobjekte 1 (Kirschbaum) und 3 (Birke) deutliche statistische Beziehungen zu den bioelektrischen Potentialen aufgefunden (Abbildung 17). Die Korrelationskoeffizienten betragen 0.55 (Kirschbaum) bzw. 0.73 (Birke) und sind positiv, d.h. bei zunehmender Temperatur nimmt das (negative) Biopotential - absolut gesehen - ab. Beim Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum) wurde - betrachtet man den gesamten Temperaturbereich - ein umgekehrtes Verhalten beobachtet: Bei zunehmender Temperatur erhöht sich das negative Biopotential. Untersucht man hier den Bereich niedriger Temperaturen ( $< 5^{\circ}\text{C}$ ) separat, so tritt auch bei diesem Objekt eine positive Korrelation (eng gestrichelte Regressionsgerade) auf und der Korrelationskoeffizient von 0.69 weist auf einen deutlichen statistischen Zusammenhang hin. Bei Temperaturen  $> 5^{\circ}\text{C}$  gibt es keinen statistischen Zusammenhang mehr, der Korrelationskoeffizient ist Null (weit gestrichelte Regressionsgerade). Für die Untersuchungsobjekte 1 (Kirschbaum) und 3 (Birke) konnte zwar ebenfalls festgestellt werden, dass die Korrelationskoeffizienten im Temperaturbereich  $< 5^{\circ}\text{C}$  etwas höher sind als im Temperaturbereich  $> 5^{\circ}\text{C}$  (0.47 gegenüber 0.38 bzw. 0.64 gegenüber 0.60), die entsprechenden Regressionsfunktionen unterscheiden sich - im Gegensatz zum Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum) - jedoch nur geringfügig.

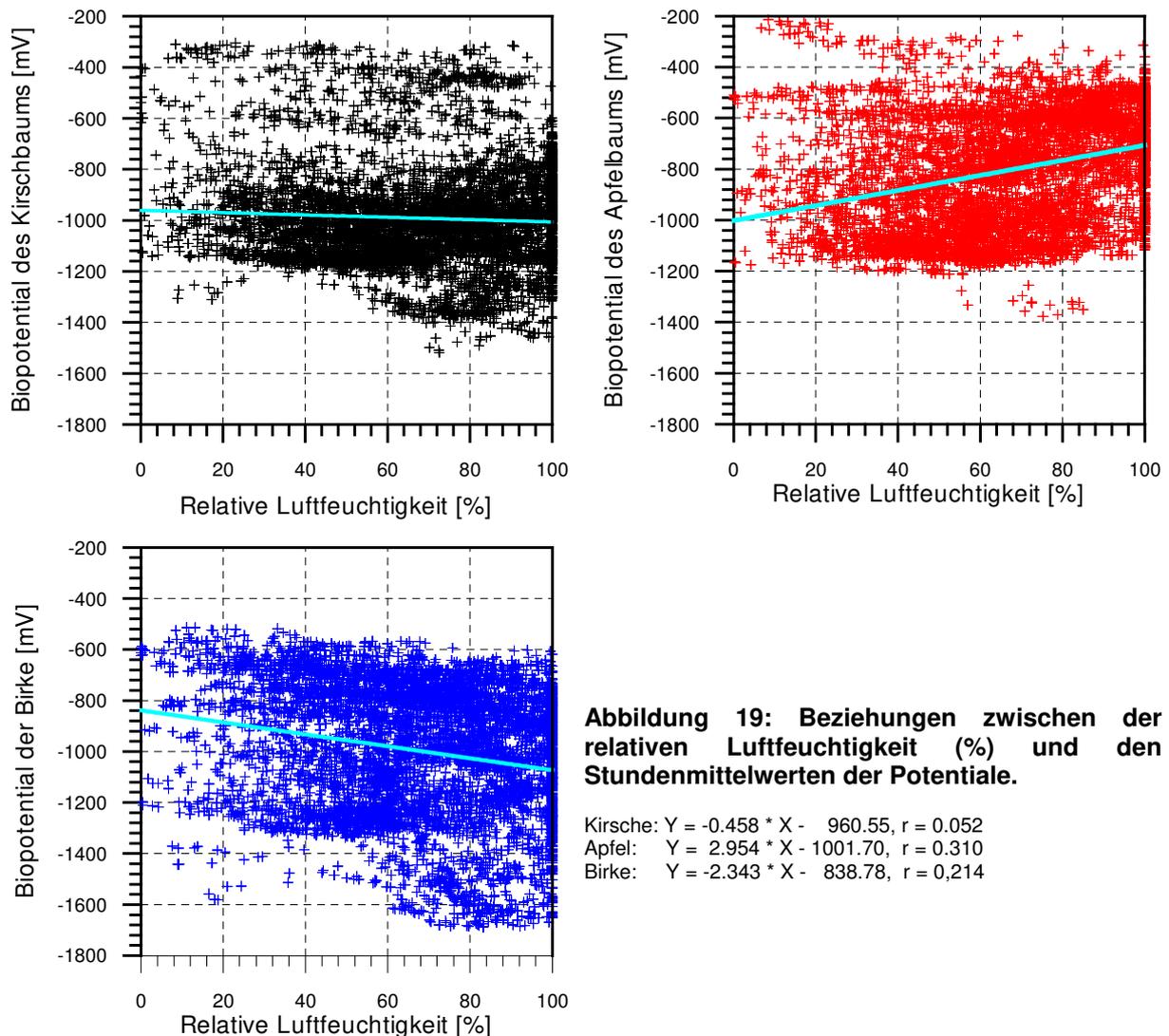


Die Abhängigkeit des bioelektrischen Potentials von der Lufttemperatur ist sicher teilweise auf die generelle Abhängigkeit des Nernst'schen Potentials von der Temperatur zurückzuführen (siehe Gleichungen 1 und 2 auf Seite 2). Dennoch kann dieser Zusammenhang nicht auf rein physikochemische Ursachen zurückgeführt werden, denn die Untersuchung seines Zeitverhaltens mit Hilfe der Kreuzkorrelationsfunktion ergab eine Verzögerung der Potentialvariationen gegenüber den Temperaturschwankungen um 1 bis 2 Stunden (Abbildung 18). Daraus folgt, dass sich der Zustrom von Wasser in die Xylemröhren erst dann verstärkt, wenn sich die Lufttemperatur bereits einige Zeit vorher erhöht hat.

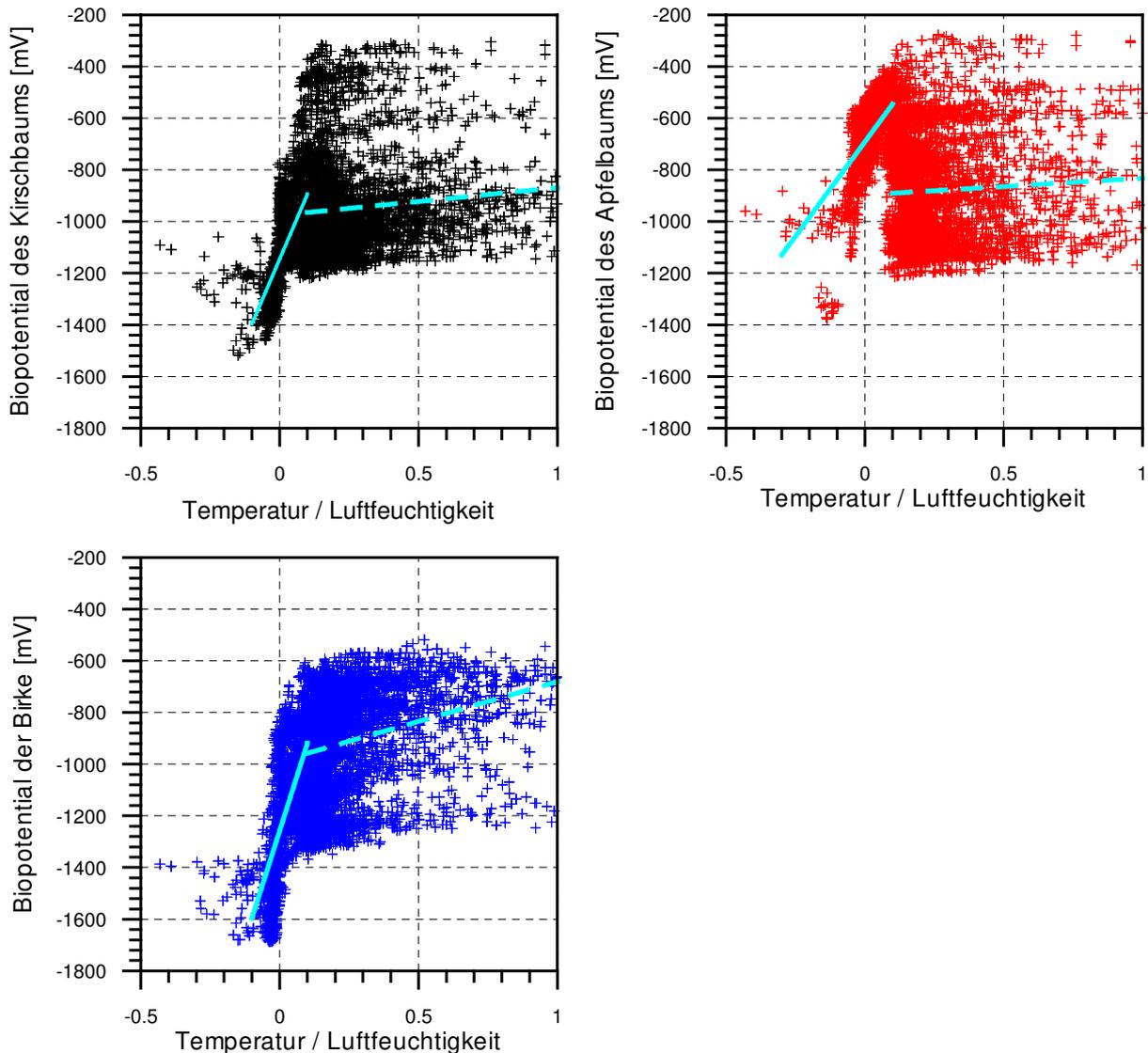


**Abbildung 18: Kreuzkorrelationsfunktionen der bioelektrischen Potentiale der Untersuchungsobjekte mit der Temperatur (schwarz - Kirschbaum, rot - Apfelbaum, blau - Birke). Die Verzögerung der Potentialvariationen gegenüber den Temperaturänderungen beträgt beim Kirschbaum 1 Stunde, beim Apfelbaum 2 Stunden und bei der Birke 1.5 Stunden.**

Für die Datenkombinationen der relativen Luftfeuchtigkeit mit den bioelektrischen Potentialen wurden nur schwache statistische Zusammenhänge gefunden (Abbildung 19). Sie sind für die Untersuchungsobjekte 1 (Kirschbaum) und 3 (Birke) negativ, d.h. bei steigender Luftfeuchtigkeit nimmt das (negative) Biopotential zu. Die Korrelationskoeffizienten betragen aber nur 0.05 bzw. 0.21. Interessant ist, dass sich auch hier das Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum) wieder entgegengesetzt verhält und dabei den höchsten Korrelationskoeffizienten aufweist (0.31).



Schließlich wurde versucht, die statistischen Zusammenhänge der bioelektrischen Potentiale mit einer zur Evapotranspiration proportionalen Größe zu erfassen. Als Maß dafür wurde der, zur Verdunstung proportionale Quotient aus der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit berechnet. Die entsprechenden Crossplots sind in Abbildung 20 dargestellt.



**Abbildung 20: Beziehungen zwischen dem Quotienten Temperatur / Relative Luftfeuchtigkeit und den Stundenmittelwerten der Potentiale.**

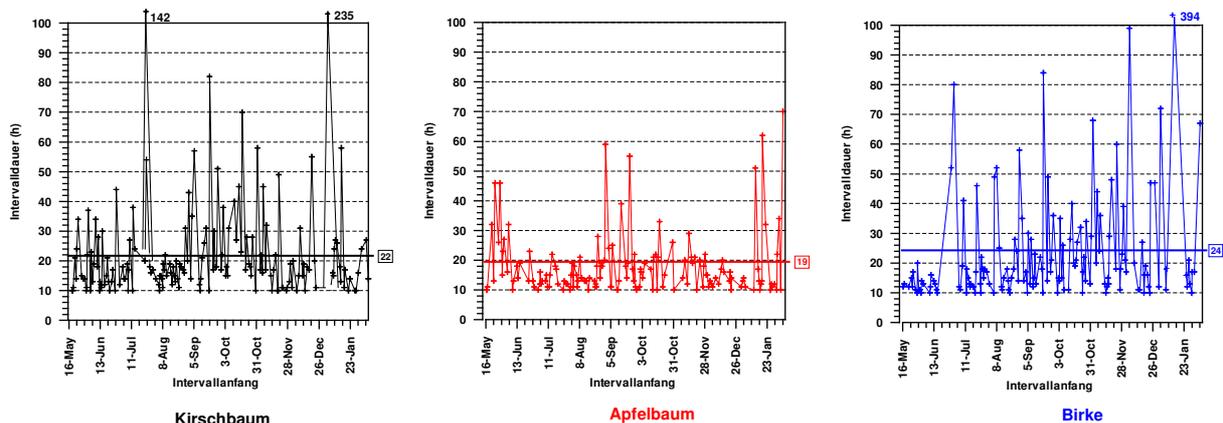
Kirschbaum: Quotient < 0.1:  $Y = 2510.940 * X - 1145.10$ ,  $r = 0.595$  | Quotient > 0.1:  $Y = 106.774 * X - 976.13$ ,  $r = 0.291$   
 Apfelbaum: Quotient < 0.1:  $Y = 1191.903 * X - 681.38$ ,  $r = 0.368$  | Quotient > 0.1:  $Y = 64.759 * X - 897.08$ ,  $r = 0.050$   
 Birke: Quotient < 0.1:  $Y = 3387.836 * X - 1257.02$ ,  $r = 0.614$  | Quotient > 0.1:  $Y = 308.254 * X - 988.38$ ,  $r = 0.250$

Hier wurde - für niedrige Quotienten (< 0.1) - wiederum bei den Untersuchungsobjekten 1 (Kirschbaum) und 3 (Birke) ein deutlicher statistischer Zusammenhang zwischen dem Verdunstungsmaß und dem Biopotential gefunden. Die Korrelationskoeffizienten betragen 0.60 bzw. 0.61. Aber auch beim Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum) besitzt die betreffende Regressionsfunktion die gleiche Tendenz, bei etwas geringerem Anstieg und der Korrelationskoeffizient erreicht immer noch 0.37. Bei höheren Verdunstungsquotienten werden die Regressionsfunktionen in allen Fällen deutlich flacher und sowohl die stark abnehmenden Korrelati-

onskoeffizienten als auch der, durch die Crossplots vermittelte visuelle Eindruck weisen darauf hin, dass der statistische Zusammenhang zwischen den betrachteten Größen erkennbar schwächer wird. Die Korrelationskoeffizienten betragen für die Untersuchungsobjekte 1 (Kirschbaum) und 3 (Birke) nur noch 0.29 bzw. 0.25 und für Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum) sogar nur noch 0.05.

## 9. Episodische Periodizität der verdunstungsabhängigen Biopotentialvariationen.

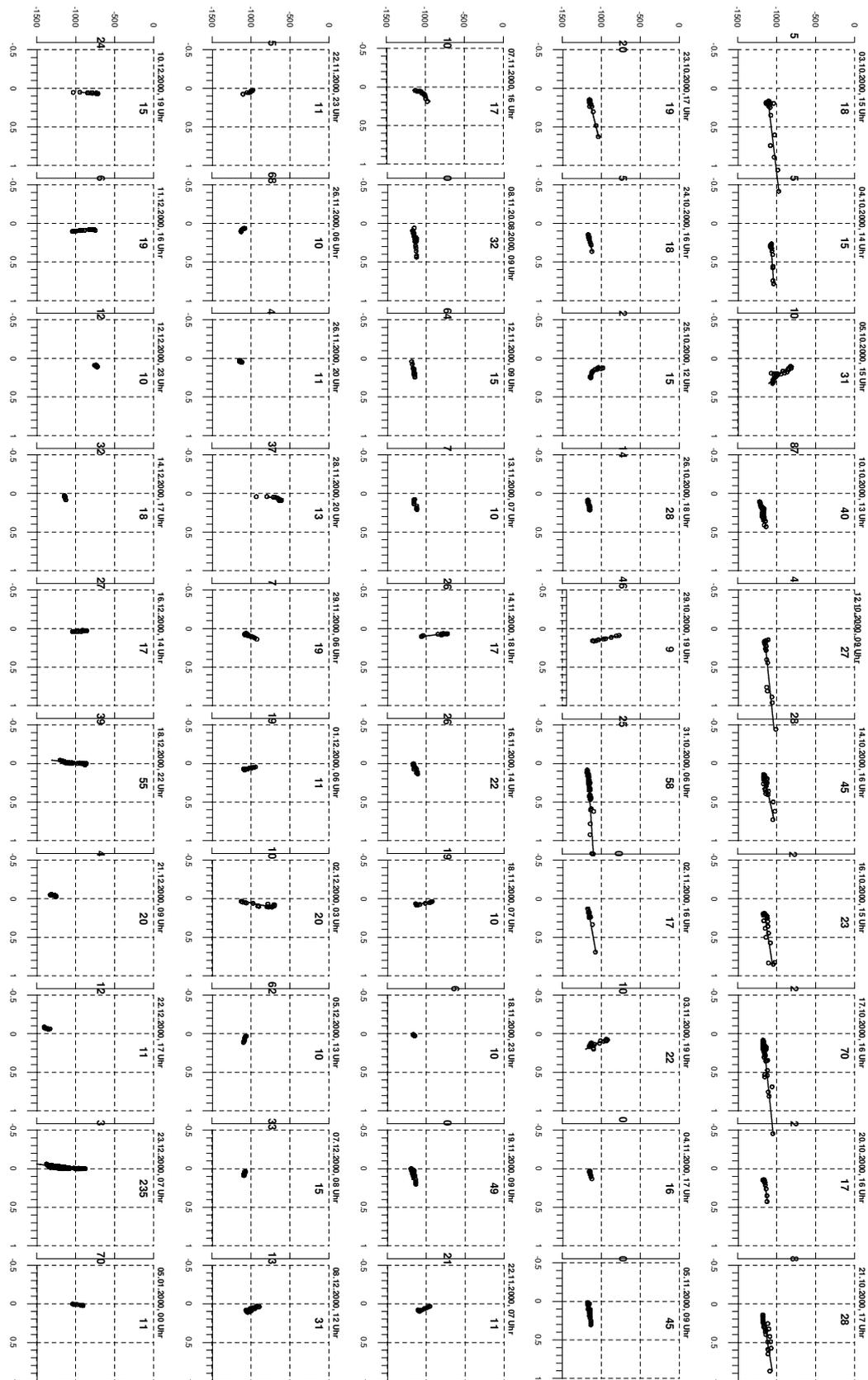
Dieses auffällige Verhalten wurde aber nicht nur als statistische Gesetzmäßigkeit erfasst sondern auch als Grundmuster der einzelnen Verlaufskurven der Biopotentialvariationen. Eine gleitende, temporäre Regressionsanalyse zwischen den Biopotentialen und dem Quotienten aus der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, bei der die Anzahl der Wertepaare jeweils solange vergrößert wurde, bis der Korrelationskoeffizient unter 0.8 absank, ergab, dass sich die Verlaufskurven aus einer Folge unterschiedlich langer, episodisch auftretender Zeitintervalle zusammensetzen, in denen ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen besteht (Abbildung 21). Interessant ist, dass die Mittelwerte der Länge dieser Intervalle trotz großer Schwankungen der Einzelwerte (z. B. beim Kirschbaum zwischen 9 und 235 Stunden) nahe beieinander liegen (Kirschbaum: 22 Stunden, Apfelbaum: 19 Stunden, Birke: 24 Stunden) und insgesamt auf einen periodischen Zusammenhang mit dem Tagesrhythmus hinweisen.



**Abbildung 21: Parameter der temporären Regressionsbeziehungen zwischen dem Quotienten aus Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit und den Potentialvariationen.**

(Die horizontalen Linien mit den umrahmten Ziffern kennzeichnen die Mittelwerte von 169 Intervallen mit linearem Zusammenhang zwischen den analysierten Größen bei einem Korrelationskoeffizienten  $> 0.8$ )

Innerhalb dieser Intervalle ist das Biopotential proportional zur Verdunstung, wobei bei geringer Verdunstung größere und bei starker Verdunstung kleinere Potentialänderungen auftreten (Abbildung 22).

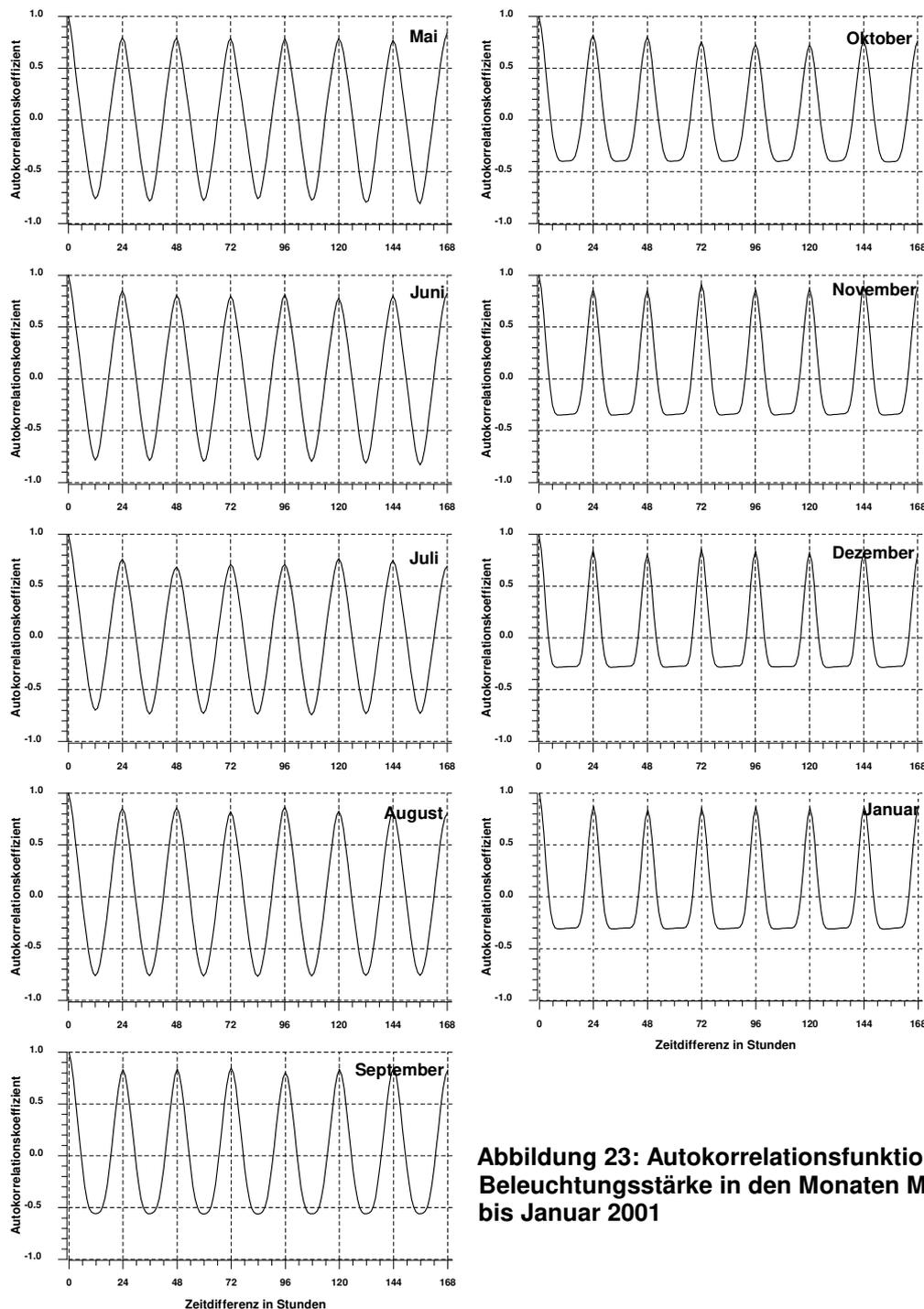


**Abbildung 22: Beispiel für die temporären Regressionsbeziehungen zwischen dem Quotienten aus Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit und den Potentialvariationen des Kirschaums innerhalb episodisch auftretender Intervalle.**

Dargestellt sind die Intervalle 101 bis 150 vom 03.10.2000, 15 Uhr bis zum 05.01.2001, 10 Uhr. Die Ziffern am rechten Ende in den Diagrammen geben die Länge der Intervalle in Stunden an. Zwischen den Diagrammen ist die Länge der Pausen zwischen den Intervallen - ebenfalls in Stunden - angegeben. Rechts neben den Diagrammen steht das Anfangsdatum des jeweiligen Intervalls.

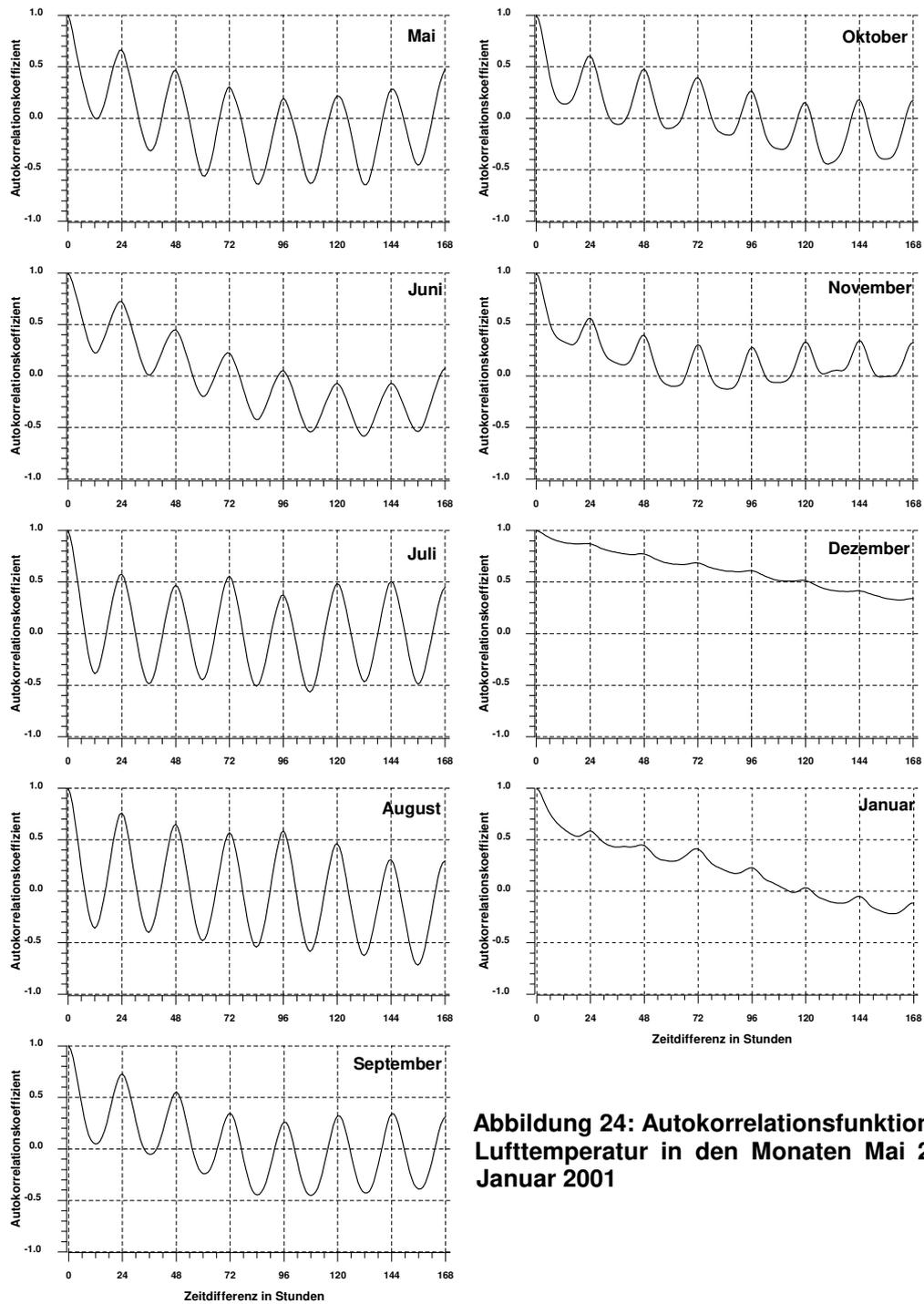
Durch die Autokorrelationsanalyse der erfassten Daten konnte nachgewiesen werden, dass der periodische Zusammenhang der Biopotentialvariationen mit dem Tagesrhythmus auf den 24-Stunden-Rhythmus der, die Verdunstung beeinflussenden Faktoren Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit zurückzuführen ist. Dazu wurden die Autokorrelationsfunktionen aller registrierten Messgrößen, für Zeitverschiebungen von 0 bis 168 Stunden berechnet, und zwar jeweils für jeden Monat des Beobachtungszeitraums getrennt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen für alle untersuchten Parameter eine Periodizität mit einer Periodendauer von 24 Stunden erkennen, die jedoch in unterschiedlichem Maße von einem zusätzlichen jahreszeitlichen Trend überlagert wird:

Am stärksten setzt sich dieser Rhythmus in allen Monaten des Beobachtungszeitraums bei der Beleuchtungsstärke durch, bei der sich in den Wintermonaten die Amplitude der Autokorrelationsfunktion nur auf der Tagseite um ca. 50 % verringert (Abbildung 23).



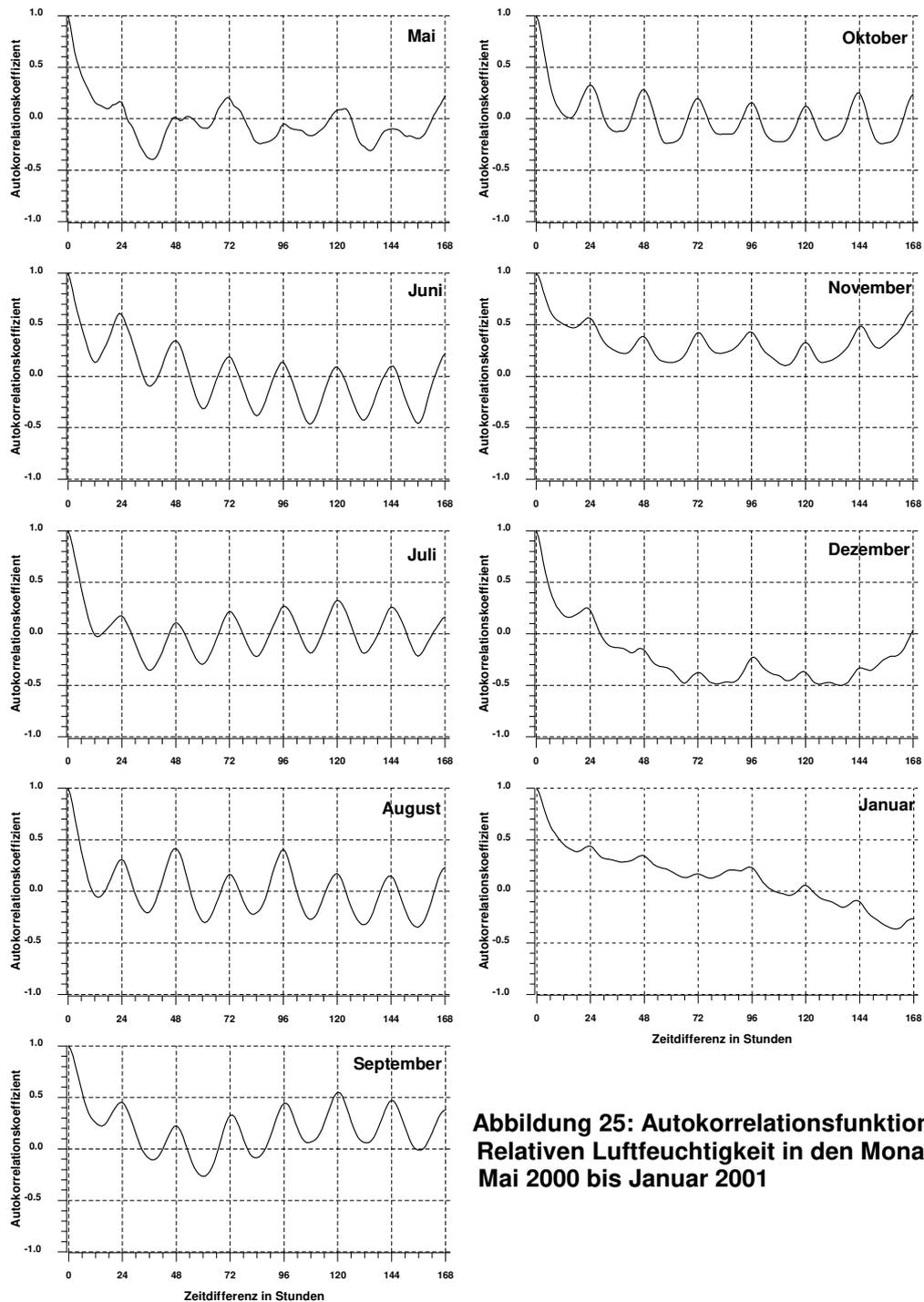
**Abbildung 23: Autokorrelationsfunktionen der Beleuchtungsstärke in den Monaten Mai 2000 bis Januar 2001**

Bei der Lufttemperatur war in den Monaten September, Oktober und November 2000 eine stetige Abnahme der Amplitude der Autokorrelationsfunktion zu beobachten, bis schließlich im Dezember keine Periodizität der Temperatur mehr erkannt werden konnte. Auch die deutlich geringeren Tagestemperaturen im Juni gegenüber denen der Monate Mai und Juli (häufig nur zwischen 10 und 15 °C) zeichneten sich in einer geringeren Amplitude der Autokorrelationsfunktion ab (Abbildung 24).



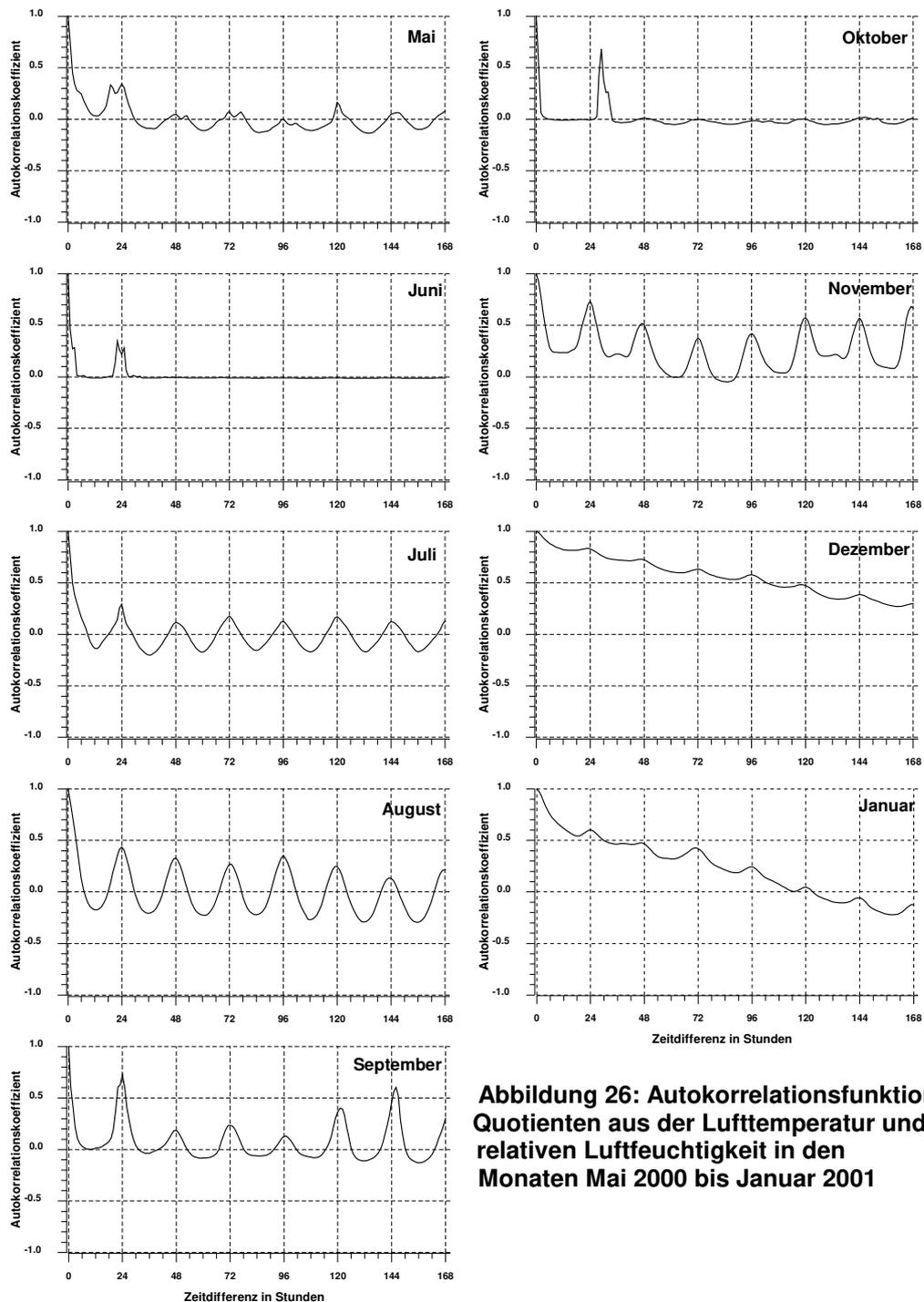
**Abbildung 24: Autokorrelationsfunktionen der Lufttemperatur in den Monaten Mai 2000 bis Januar 2001**

Die Autokorrelationsfunktionen der relativen Luftfeuchtigkeit bilden ebenfalls deutlich die Abnahme des Tagesrhythmus dieser Messgröße von den Sommermonaten bis zum Spätherbst ab. Im Dezember 2000 und im Januar 2001 war keine Periodizität mehr erkennbar. Aber auch im Mai 2000 war der erst Anfang Juni einsetzende Tagesrhythmus noch nicht voll entwickelt (Abbildung 25)



**Abbildung 25: Autokorrelationsfunktionen der Relativen Luftfeuchtigkeit in den Monaten Mai 2000 bis Januar 2001**

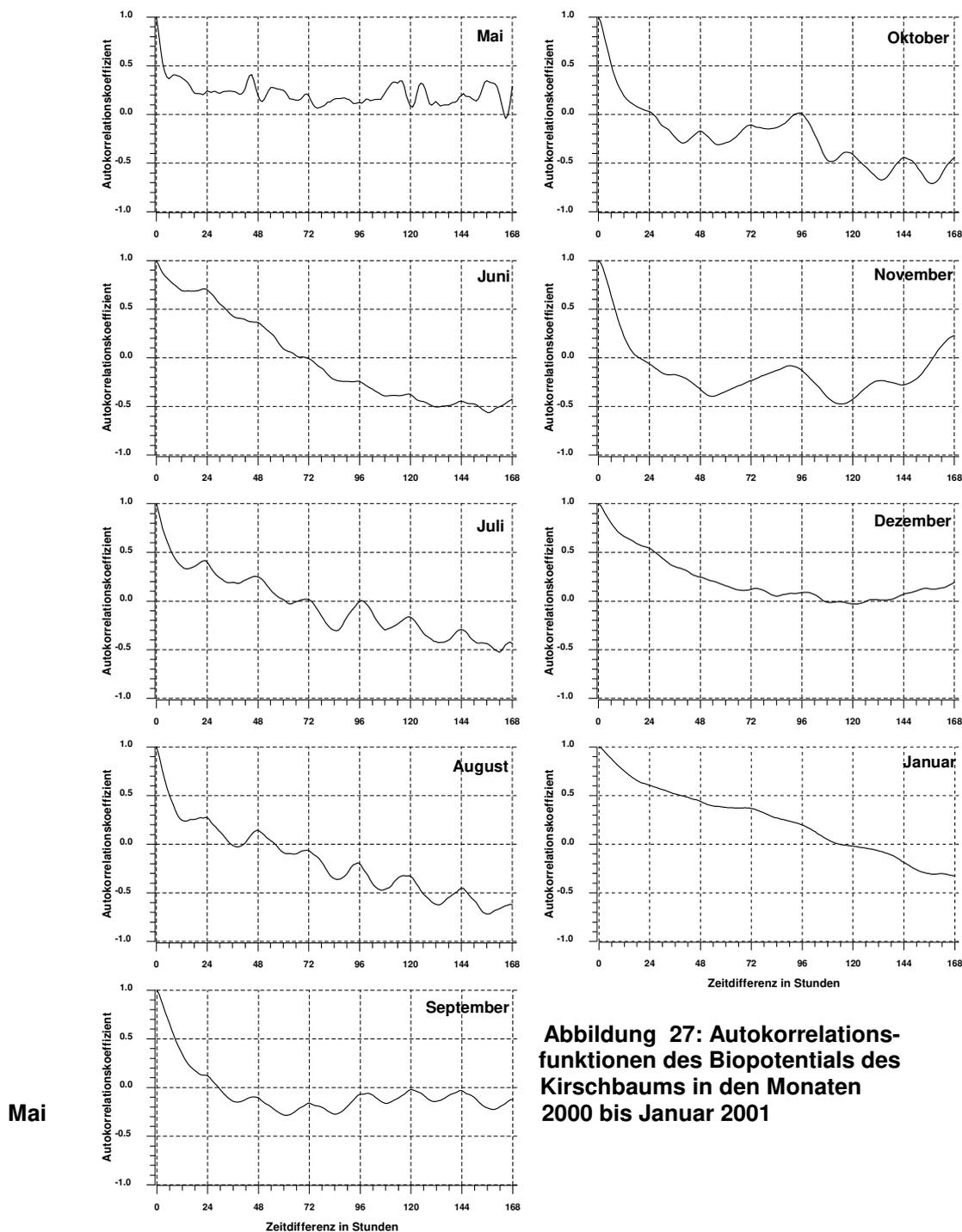
Die Autokorrelationsfunktionen des Quotienten aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit sind in Abbildung 26 dargestellt. Sie weisen einen 24-Stunden-Rhythmus dieser, die Verdunstung beschreibenden Größe nach, dessen Tagesamplitude von Mai bis August anstieg, dann wieder abnahm und im Dezember und Januar fast verschwand. Abweichend von dieser jahreszeitlichen Entwicklung war nach den entsprechenden Autokorrelationskurven in den Monaten Juni und Oktober 2000 infolge der vorherrschenden kühlen und feuchten Witterung keine Periodizität der Verdunstung erkennbar.



**Abbildung 26: Autokorrelationsfunktionen des Quotienten aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit in den Monaten Mai 2000 bis Januar 2001**

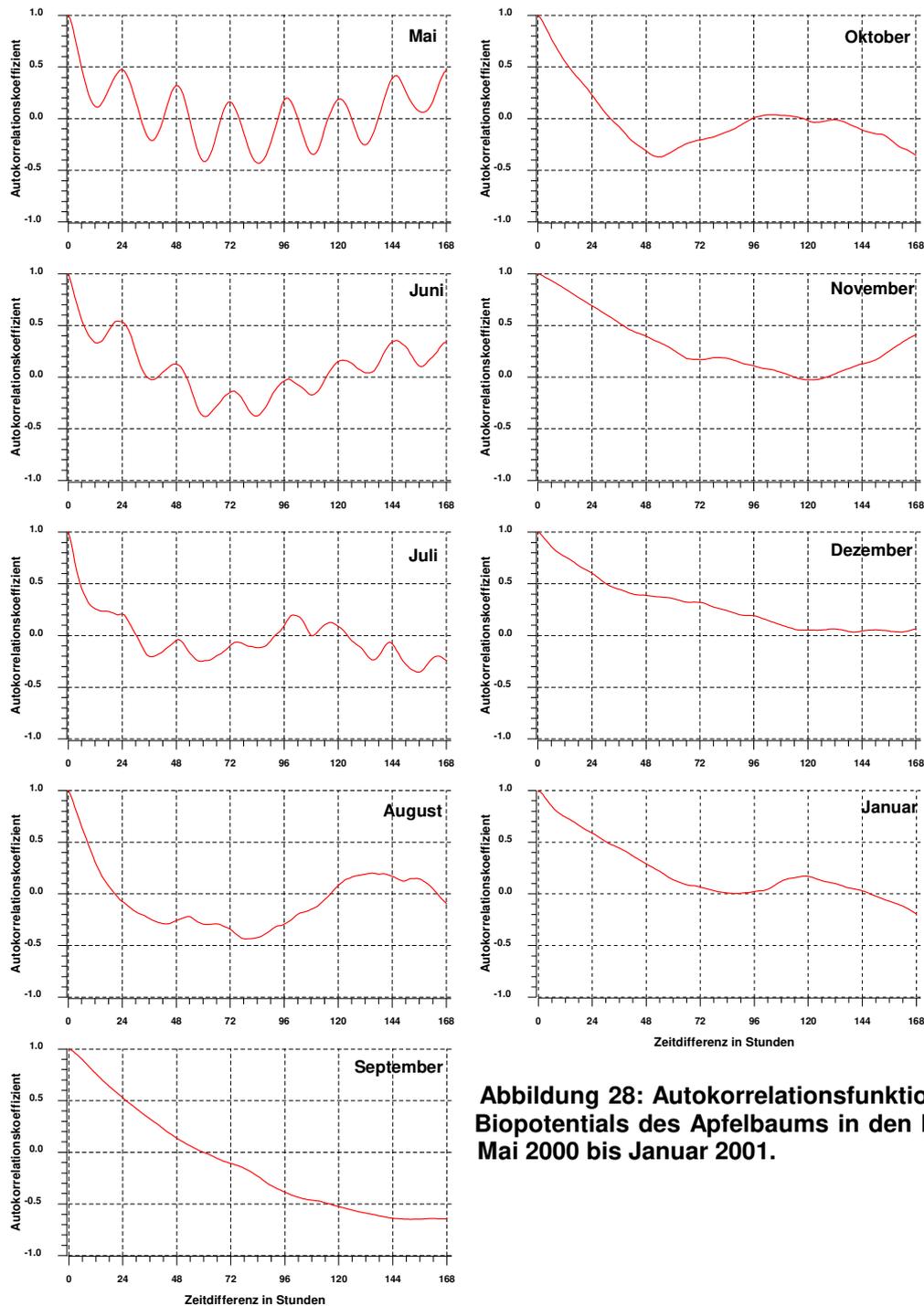
Die Autokorrelationsfunktionen der Biopotentiale lassen zwar ebenfalls unterschiedliche Ausprägungen der Periodizität in den verschiedenen Monaten des Beobachtungszeitraums erkennen, die sich jedoch bei den drei Versuchsobjekten voneinander unterscheiden:

Beim Untersuchungsobjekt 1 (Kirschbaum, Abbildung 27) sind die Autokorrelationsfunktionen - mit Ausnahme des Monats November 2000, in dem das Biopotential keine Periodizität aufwies - den Autokorrelationsfunktionen des Quotienten aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ähnlich. In den Monaten Juli, August und September war der 24-Stunden-Rhythmus deutlich ausgeprägt. In den übrigen Monaten war keine bzw. nur eine chaotische, d.h. durch wechselnden Periodenlängen charakterisierte Periodizität vorhanden.



**Abbildung 27: Autokorrelationsfunktionen des Biopotentials des Kirschbaums in den Monaten 2000 bis Januar 2001**

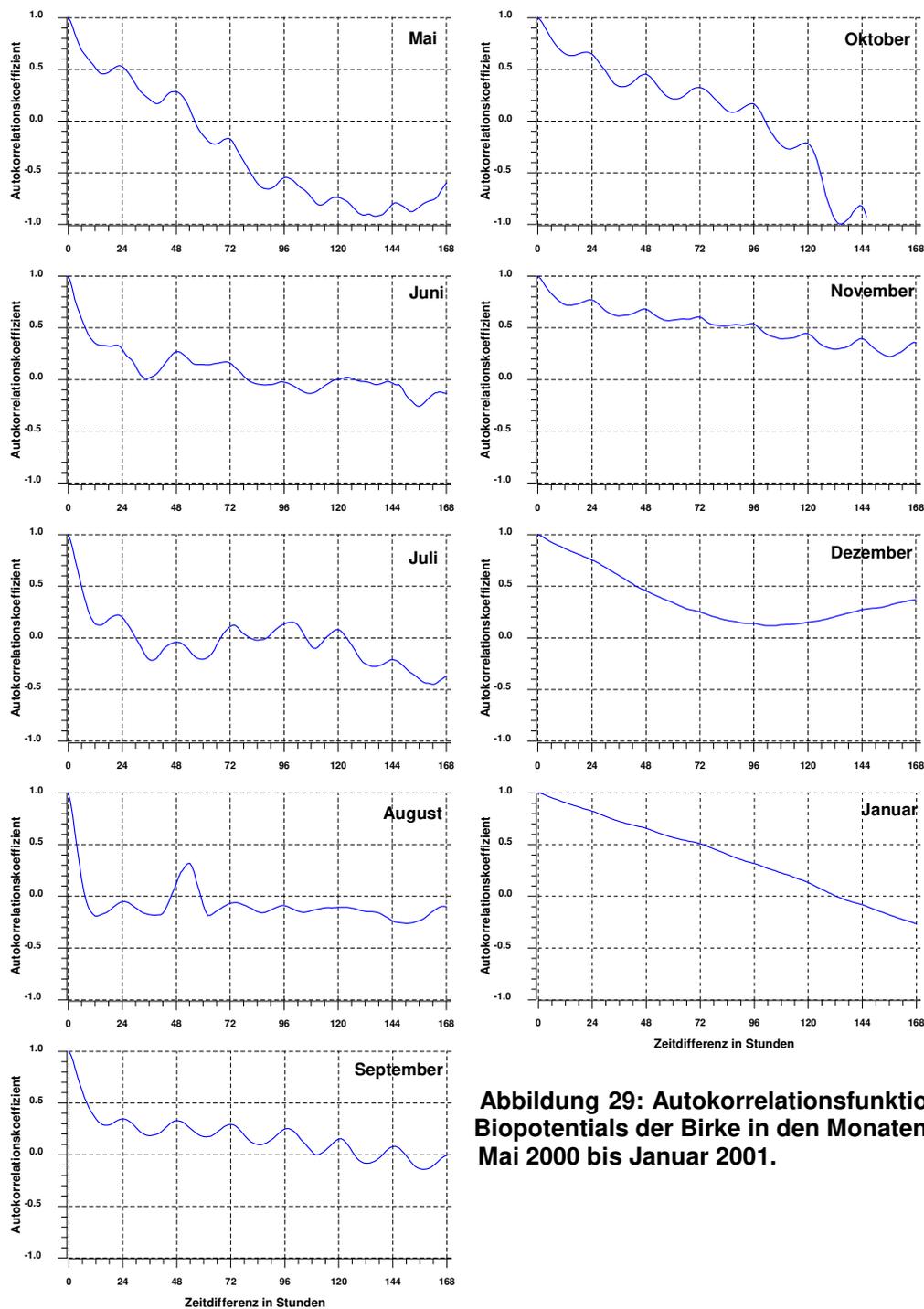
Das Untersuchungsobjekt 2 (Apfelbaum, Abbildung 28) wies dem gegenüber ein abweichendes Verhalten auf. Hier wurde die deutlichste Ausprägung des 24-Stunden-Rhythmus im Mai beobachtet. Im Juni war die Periodizität bereits deutlich schwächer. Im Juli nahm sie chaotischen Charakter an und ab August verschwand sie bis zum Ende des Beobachtungszeitraums völlig.



**Abbildung 28: Autokorrelationsfunktionen des Biopotentials des Apfelbaums in den Monaten Mai 2000 bis Januar 2001.**

Das Biopotential der Birke (Untersuchungsobjekt 3, Abbildung 29) war in den Monaten Mai bis November 2000 generell durch periodische Veränderungen im 24-Stunden-Rhythmus

charakterisiert. Im Juni und August waren diese jedoch durch andersartig verlaufende Prozesse z.T. stark gestört.



**Abbildung 29: Autokorrelationsfunktionen des Biopotentials der Birke in den Monaten Mai 2000 bis Januar 2001.**

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Autokorrelationsfunktionen der Biopotentiale bei allen drei Objekten in bestimmten Monaten eine Periodizität mit 24-Stunden-Rhythmus aufweisen. Die jahreszeitliche Veränderung dieser Periodizität ist bei den Untersuchungsobjekten 1 (Kirschbaum) und 3 (Birke) der des Quotienten aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ähnlich. Der über 30 Jahre alte Apfelbaum, für den oben bereits aus anderen Gründen eine abweichende Reaktion auf die physikalischen Umwelteinflüsse vermutet wurde, besaß nur im Frühjahr periodische Biopotentialvariationen und zeigte keine Ähnlichkeit seiner Autokorrelationsfunktionen mit denen des Quotienten aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit.

## 10. Interpretation der Messergebnisse

Die beobachteten Biopotentialvariationen bilden wahrscheinlich eine Regelungsfunktion der Pflanzen ab, die einen zu starken Wasserverlust durch Verdunstung verhindert. Bei zunehmender Verdunstung infolge ansteigender Temperatur und abnehmender Luftfeuchtigkeit schließen sich die Stomata der Blätter immer stärker und begrenzen das durch die Strömung von Ladungsträgern durch die Tracheen verursachte Potential auf einen witterungsbedingten Grenzwert, dessen Minimum - absolut gesehen - ca. -300 mV bei den Obstbäumen, bzw. ca. -600 mV bei der deutlich größeren Birke beträgt. Wenn dann alle Stomata geschlossen sind, setzt sich die Verdunstung bei weiterem Temperaturanstieg bzw. weiter zunehmender Trockenheit nur noch infolge der Diffusion des Wassers durch die Zellwände fort. Dieser Prozess geht wesentlich langsamer vor sich, so dass die mit dem Nachströmen des Wassers im Xylem verbundene Potentialänderung viel schwächer ist. Er wird auch im stärkeren Maße durch zusätzliche Faktoren (Wind, gegenseitige Beschattung der Bäume, Luftdruckschwankungen usw.) beeinflusst, so dass die, in den Crossplots erkennbare statistische Streuung der Wertepaare deutlich größer wird.

Wenn dieser Regelungsprozess gestört ist, dann verliert der betreffende Baum entweder zu viel Wasser durch Verdunstung und verdorrt oder - und das trifft wahrscheinlich auf den überalterten Apfelbaum (Versuchsobjekt 2) zu - dann schließen die Stomata zu früh. In diesem Fall herrscht an der Peripherie nur eine geringe Tension und den Zellen steht über einen längeren Zeitraum nur Wasser zur Verfügung, in dem der Anteil elektrischer Ladungsträger und Spurenelemente bereits stark angereichert ist, so dass diese ihre katalytischen Funktionen bei der Photosynthese und beim Aufbau neuer Zellen nicht bzw. nur stark vermindert ausüben können. In der Verlaufskurve des bioelektrischen Potentials sind solche Stagnationsintervalle als Zeitabschnitte mit fast konstantem Verlauf erkennbar. Die Autokorrelationsfunktionen weisen in den betreffenden Zeitabschnitten keine Anzeichen einer Periodizität auf.

Die dargestellten Ergebnisse beschreiben, wegen der fast nur punktförmigen Biopotentialsonde nur das Verhalten weniger Tracheen, die sich in deren unmittelbarer Umgebung befinden. Der Saftstromtransport im gesamten Xylem wird wahrscheinlich davon erheblich abweichen.

Die beobachteten, episodisch auftretenden periodischen Variationen der bioelektrische Potentiale von Bäumen sind wahrscheinlich durch periodische Veränderungen der physikalischen Umweltbedingungen evozierte Potentialvariationen. Je ähnlicher der Potentialverlauf zur zeitlichen Änderung der, die Verdunstung bestimmenden Faktoren ist, desto ausgeprägter ist die Fähigkeit der betreffenden Pflanze, sich schnell den entsprechenden Veränderungen der physikalischen Umweltbedingungen anzupassen. Da diese Fähigkeit ein Kennzeichen der "Vitalität" ist, kann die Messung und Analyse von Biopotentialvariationen mit einer größeren Anzahl von Potentialsonden möglicherweise in diesem Sinne als Vitalitätstest eingesetzt werden.

Da die zeitlichen Änderungen der Biopotentiale für verschiedene Bäume unterschiedlich verlaufen und neben den periodischen Variationen zahlreiche weitere Verlaufslemente enthalten, die durch bisher ungeklärte Ursachen entstehen, ist eine Anwendung der beschriebenen Methodik zur verbesserten Interpretation der Messergebnisse von Geopotentialen nicht erfolversprechend.

## 11. Zusammenfassung

Ausgehend von theoretischen Betrachtungen zur Entstehung bioelektrischer Potentiale von Bäumen wurde für deren Messung eine autonome, registrierende Station entwickelt und an drei Versuchsobjekten (Kirschbaum, Apfelbaum, Birke) über einen Zeitraum von 9 Monaten getestet. Neben den Biopotentialen der Bäume wurden Beleuchtungsstärke, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Niederschlag im Minutentakt gemessen. Die statistische Analyse der Messwerte ergab, dass die Biopotentialvariationen innerhalb episodisch auftretender Zeitintervalle periodisch im 24-Stunden-Rhythmus der physikalischen Umweltbedingungen (insbesondere der Verdunstung) verlaufen. Die Periodizität der Biopotentialvariationen wird von einem jahreszeitlichen Trend überlagert, verschwindet in den Wintermonaten und wird von länger anhaltenden Witterungsschwankungen beeinflusst. Sie bildet wahrscheinlich eine Regelungsfunktion der Pflanzen ab, die einen zu starken Wasserverlust durch Verdunstung verhindert. Die unterschiedlichen Biopotentialvariationen der drei Versuchsobjekte weisen darauf hin, dass sie möglicherweise das unterschiedlichen Reaktionsvermögen der Bäume auf Veränderungen der Umweltbedingungen widerspiegeln und damit ein Ausdruck ihrer unterschiedlichen "Vitalität" sind.

## 12. Anmerkungen und Literatur

- [01] H. Militzer, F. Weber: Angewandte Geophysik, Bd 2, Springer Verlag 1985, S. 175.
- [02] Roche - Lexikon Medizin ([www.lifeline.de/roche](http://www.lifeline.de/roche))
- [03] Encyclopaedia Britannica, Stichworte: Bioelectricity, Bioelectric effects ([www.Britannica.com](http://www.Britannica.com)).
- [04] <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/forst/institut-fuer-forstnutzung-und-forsttechnik/fn/forschung/forschungsprojekte/mondholz>
- [05] <https://kalender-365.de/mondkalender.php?yy=2000>
- [06] Beim unbemerkten Austrocknen der unpolarisierbaren Bodenelektrode infolge des vollständigen Versickerns der Kupfersulfatlösung im Boden stiegen alle drei Potentialwerte über mehrere Stunden bis auf 0 mV an. Diese Störung trat in folgenden Zeiträumen auf: Vom 10.07. 15:00 Uhr bis einschl. 11.07. 06:00 Uhr, vom 14.07. 08:00 Uhr bis einschl. 14.07. 21:00 Uhr, vom 13.08. 07:00 Uhr bis einschl. 13.08. 12:00 Uhr, vom 26.09. 09:00 Uhr bis einschl. 26.09. 18:00 Uhr.
- [07] Der Regressionskoeffizient erhöht sich sogar noch von 0.66 auf 0.81, wenn nur die Potentialwerte < 900 mV betrachtet werden, die von technisch bedingten Störungen, wie z.B. Austrocknung der unpolarisierbaren Bodenelektrode - siehe Fußnote 4 - nicht betroffen sind.