

Diss. ETH No. 19259

Detection of Abiotic Stress in Plants through a Wireless Water-Flow Sensor

A dissertation submitted to the
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Moritz Köhler

Dipl. Inf., Technische Universität München, Germany

born November 6, 1980

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Stamp, examiner

Prof. Dr. Friedemann Mattern, co-examiner

PD Dr. Jörg Leipner, co-examiner

2010

Summary

The worldwide market for ornamental plants has a volume of more than U.S. \$50 billion, and ornamental plants can have a high value. Due to this, it is advantageous to keep ornamental plants in optimal conditions. Nevertheless, they can be exposed to abiotic stress factors such as drought, low temperatures, or darkness. Approaches to measuring stress reactions as they are applied to agricultural crops are difficult to use with ornamental plants. The main reasons are the cost involved, practicability, and aesthetics. The presented work addresses the development and application of technologies and methods for the efficient yet cost-effective measurement and evaluation of stress reactions of ornamental plants in general and indoor plants in particular.

Irrigation systems can be grouped into sub-irrigation and surface irrigation systems. The biggest advantage of sub-irrigation compared to surface irrigation lies in the fact that sub-irrigation systems can store a larger amount of plant-available water, while, at the same time, preventing stagnant moisture. In the scope of the presented work, a Sub-irrigation water-flow (SWF) sensor was developed to measure the flow of water in sub-irrigation systems. Based on a level measurement by means of electromagnetic switching elements, it was possible to digitize the flow rate cost-efficiently and to transfer it wirelessly to a remote server. The measured flow rate is directly coupled to the evapotranspiration rate of the plant-substrate system. Using the SWF sensor, it was possible to determine the sum of transpiration and (minor) evaporation from the plant-substrate.

The applicability of the SWF sensor to quantify stress reactions was shown through a scientific experiment. Stress experiments were carried out with model plants *Musa acuminata* and *Ficus binnendijkii* 'Alii'. In order to investigate the effects of temperature on evapotranspiration, plants were kept at optimal (22°C) as well as suboptimal (17°C, 12°C, and 7°C) temperature conditions for 5 to 7 days. Darkness stress was imposed for 5 to 9 days. In parallel, a control group was kept under greenhouse conditions at 22°C. Cold stress and darkness stress treatments were carried out simultaneously. Before, during, and after periods of stress, measurements were done of the evapotranspiration rate (using SWF sensors), as well as the maximal quantum efficiency of photosystem II primary photochemistry (F_v/F_m) and stomatal conductance.

A significantly lower evapotranspiration rate compared to the control group was observed for *M. acuminata* at 7°C. Due to high dark transpiration, which was evident through guttation, significantly lower evapotranspiration was observed only during the 7-day darkness stress. For *F. binnendijkii*, guttation was marginal. Therefore, a significantly lower evapotranspiration rate was observed during each phase of the dark stress. None of the cold stress treatments showed significantly lower evapotranspiration rates.

A possible field of application of the stress detection method based on an evapotranspiration model is private homes and office buildings. For a large-scale rollout, methods and tools are needed that allow the deployment and administration of millions of sensors. These methods must support the management of collected data in a structured manner and make it available for users. Thus, a framework was developed that allows an application engineer to quickly build and deploy systems for remote plant management and observation. The focus was on extracting query patterns that can be used to query incoming sensor data efficiently for vitality information. The framework was implemented prototypically in order to support the aforementioned stress experiments.

Zusammenfassung

Zierpflanzen stellen mit einem weltweiten Umsatz von ca. US \$50 Mrd. einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar und besitzen teilweise einen hohen Wert. Daher ist es gewünscht Zierpflanzen unter möglichst optimalen Umweltbedingungen zu halten. Dennoch können sie abiotischen Stressbedingungen wie Trockenheit, niedrigen Temperaturen oder Dauerdunkel ausgesetzt werden. Ansätze zum Messen von Stressreaktionen, wie sie bei Nutzpflanzen angewandt werden, sind bei Zierpflanzen nur bedingt möglich. Die Ursachen hierfür liegen massgeblich bei den Kosten, der Praktikabilität und der Ästhetik. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der Entwicklung und Anwendung von Technologien und Verfahren zum effizienten und kostengünstigen Messen und Bewerten von Stressreaktionen bei Zierpflanzen im Allgemeinen und bei Zimmerpflanzen im Speziellen.

Abhängig vom Bewässerungsverfahren können Bewässerungssysteme für Zimmerpflanzen in Unterflur- und Erdbewässerungssysteme eingeteilt werden. Der grösste Vorteil von Unterflur- gegenüber Erdbewässerungssystemen liegt darin, dass sie, bei gleichzeitigem Verhindern von Staunässe, eine grössere Menge an pflanzenverfügbarem Wasser speichern können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Sub-irrigation water-flow (SWF) Sensor zum Messen des Wasserflusses in Unterflurbewässerungssystemen entwickelt. Basierend auf einer Pegelmessung mittels elektromagnetischer Schaltelemente konnte damit die Fliessgeschwindigkeit kosteneffizient digital quantifiziert und per drahtloser Datenübertragung an einen

entfernten Server übertragen werden. Die gemessene Flussgeschwindigkeit ist dabei direkt an die Evapotranspirationsrate des Pflanze-Substrat-Systems gekoppelt. Mit Hilfe des SWF Sensors war es somit möglich, die Summe aus der Rate der pflanzlichen Transpiration und der (geringen) Evaporation aus dem Pflanzsubstrat zu bestimmen.

Die Anwendbarkeit des SWF Sensors zur Quantifizierung von Stressreaktionen wurde im Rahmen eines pflanzenwissenschaftlichen Experiments gezeigt. Stressexperimente wurden mit den Zimmerpflanzen *Musa acuminata* und *Ficus binnendijkii* 'Alii' als Modellpflanzen durchgeführt. Um den Effekt der Temperatur auf die Evapotranspirationsrate zu untersuchen, wurden die Pflanzen unter optimalen (22°C) sowie unter suboptimalen (17°C, 12°C und 7°C) Bedingungen im Zeitrahmen von 5-7 Tagen gehalten. Dunkelstress wurde bei 22°C für 5 bis 9 Tage durchgeführt. Die Kontrollgruppe wurde parallel dazu bei 22°C unter Gewächshausbedingungen gehalten. Die Kälte- und Dunkelstressverfahren wurden zeitgleich durchgeführt. Vor, während und nach den Stressperioden wurden Evapotranspirationsrate mittels des SWF Sensors sowie maximale Quanteneffizienz von Photosystem II (F_v/F_m) und stomatäre Leitfähigkeit gemessen.

Eine signifikant geringere Evapotranspiration im Vergleich zur Kontrollgruppe konnte bei *M. acuminata* bei Kältestress von 7°C beobachtet werden. Aufgrund einer hohen Dunkeltranspiration, welche sich auch anhand einer starken Guttation zeigte, konnte eine signifikante Abnahme der Evapotranspirationsrate nur während der 7-tägigen Dunkelstressphase beobachtet werden. Bei *F. binnendijkii* war die Guttation marginal. Daher konnte in allen Dunkelstressphasen eine signifikant niedrigere Evapotranspirationsrate im Vergleich zur Kontrollgruppe beobachtet werden. Eine grössere Kältetoleranz im Vergleich zu *M. acuminata* wurde für *F. binnendijkii* beobachtet; in keinem Kältestressverfahren lag eine signifikant reduzierte Evapotranspirationsrate vor.

Ein mögliches Anwendungsgebiet des Stressdetektionsverfahrens basierend auf den Evapotranspirationsmodell sind Wohnräume und Bürogebäude. Für den grossflächigen Einsatz werden dabei Hilfsmittel benötigt, die es erlauben, Millionen von Sensoren an das Internet anzuschliessen, zu verwalten und deren Daten sinnvoll und wohlstrukturiert abfragen zu können. Hierzu wurde in der vorliegenden Arbeit ein Rahmenwerk geschaffen, das es einem Anwendungsentwickler ermöglicht, schnell konkrete Instanzen

von Pflanzenstressüberwachungssystemen zu entwickeln. Dabei lag der Schwerpunkt beim Extrahieren von Abfragemustern, die genutzt werden können, um den kontinuierlich ankommenden Sensordatenstrom sinnvoll und effizient nach gesuchten Informationen abfragen zu können. Das Rahmenwerk wurde prototypisch zum Unterstützen der zuvor aufgeführten Stressexperimente implementiert.