

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 986 804**

51 Int. Cl.:

**G01N 33/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.09.2021 PCT/NL2021/050552**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.03.2022 WO22055353**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.09.2021 E 21794205 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.05.2024 EP 4211458**

54 Título: **Método para determinar los parámetros físicos del tejido vascular de una planta**

30 Prioridad:

**11.09.2020 NL 2026453**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**12.11.2024**

73 Titular/es:

**TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT (50.0%)**

**Stevinweg 1**

**2628 CN Delft, NL y**

**WAGENINGEN UNIVERSITEIT (50.0%)**

72 Inventor/es:

**VERBIEST, GERARD JAN;**

**STEENEKEN, PETER GERARD;**

**DUTTA, SATADAL;**

**KAISER, MARTIN ELIAS y**

**MALCOLM MATAMOROS, PRISCILA ROCÍO**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 986 804 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Método para determinar los parámetros físicos del tejido vascular de una planta

Campo de la invención

5 La invención se refiere a un método para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular. La invención se refiere además a un sistema para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular.

Antecedentes de la invención

10 Los métodos para caracterizar una dimensión de xilema son conocidos en la técnica. Por ejemplo, Pan et al., "A comparison of two methods for measuring vessel length in woody plants", Plant, Cell and Environment, 2015, describe que las longitudes de los vasos son importantes para los estudios hidráulicos de plantas, pero frecuentemente no se informa acerca de las mismas debido al tiempo requerido para obtener las mediciones. El artículo compara un método dinámico con un método estático tradicional. Para ambos métodos, se corta en trozos un segmento de tallo de la planta.

15 Guillaume et al., "Changes in ultrasound velocity and attenuation indicate freezing of xylem sap", Agricultural and Forest Meteorology, 2014, describe que (i) la congelación del xilema puede detectarse por un aumento de 1,2-3,6 veces en la velocidad de propagación de los ultrasonidos y una disminución de la atenuación de la onda, que (ii) la atenuación de los ultrasonidos se reduce dependiendo de la transición de agua a hielo y de la temperatura, y que (iii) la propagación de los ultrasonidos en la madera permite la detección de hielo en el xilema de los árboles.

20 El documento EP2359678A1 describe un método que incluye medir una frecuencia de ocurrencia de ondas elásticas generadas por cavitaciones en los tejidos vasculares en una planta vascular, antes y después de un cambio en el estrés hídrico de la planta vascular, respectivamente mediante un sensor de recepción de ondas elásticas fijado a un eje de la planta vascular, calcular una tasa de cambio de la frecuencia de ocurrencia, a partir de la frecuencia de ocurrencia de la onda elástica medida antes y después del cambio, respectivamente, y determinar si una embolia en el tejido vascular alcanza o no un nivel de embolia irre recuperable, a partir de la tasa de cambio calculada.

25 Brodersen et al., "In vivo visualization of the final stages of xylem vessel refilling in grapevine (Vitis vinifera) stems", New Phytologist, 2017, describe una tomografía microcomputarizada de rayos X (microCT) in vivo para visualizar las etapas finales del relleno de xilema en la vid (Vitis vinifera) junto con microscopía electrónica de barrido.

30 El documento EP3667312A1 describe un sistema que incluye: un excitador de vibración que imparte una vibración predeterminada a un tallo o una rama entre una fruta y un pedúnculo que crece en una planta; un sensor de vibración que detecta la vibración del tallo o de la rama causada por la vibración impartida por el excitador de vibración; y un detector que detecta un peso o cambio de peso de la fruta en base a una frecuencia de la vibración detectada por el sensor de vibración.

Sumario de la invención

35 El transporte de agua y de nutrientes en las plantas ha atraído mucha atención en las últimas décadas. En las plantas vasculares, el transporte de agua y de nutrientes es gestionado por el tejido vascular. En particular, el transporte de agua puede ser gestionado principalmente por vasos de xilema, y los nutrientes producidos a partir de la fotosíntesis pueden ser transportados principalmente por vasos de floema.

40 La obtención de una mejor comprensión de la fisiología de las plantas como una función de la edad, los parámetros genéticos y ambientales es útil para cultivar y reproducir cultivos, frutas, flores y árboles. En particular, los vasos de xilema se consideran los conductos de soporte vital para el agua y los nutrientes iónicos en las plantas, y las dimensiones del xilema pueden ser indicativas de la capacidad de transporte de agua y de la resistencia al estrés. Si los cultivadores pueden medir los parámetros en la planta, tales como las dimensiones del xilema, esto pueden usarse para optimizar las condiciones de crecimiento en el interior de un invernadero y/o para seleccionar plantas adecuadas para su posterior cultivo, lo que puede permitir a un cultivador mejorar el rendimiento.

45 Sin embargo, las técnicas de la técnica anterior para determinar la anatomía vascular de una planta, tales como la microscopía óptica y la microscopía electrónica, generalmente pueden ser destructivas y pueden consumir mucho tiempo. Por ejemplo, las técnicas actuales pueden obtener (i) un diámetro de los vasos del xilema usando microscopía óptica, (ii) una longitud de los vasos del xilema usando infusión de pintura de látex acoplada con microscopía óptica, (iii) una longitud de los elementos de vaso del xilema usando microscopía electrónica de barrido, y (iv) un módulo elástico de los vasos del xilema mediante carga de tracción uniaxial. Para todas estas técnicas, generalmente puede ser necesario cortar la planta en pedazos para obtener datos.

50 De esta manera, con las técnicas de la técnica anterior puede ser particularmente desafiante, si no prácticamente

imposible, por ejemplo, relacionar el desarrollo de una planta específica con las características de su tejido vascular, ya que, entre otras cosas, los métodos de la técnica anterior pueden suponer un desperdicio ya que las plantas pueden dañarse (al menos parcialmente) o incluso destruirse, de manera que su tejido vascular no pueda estudiarse como una función del tiempo.

- 5 Por lo tanto, un aspecto de la invención es proporcionar un método alternativo para determinar un parámetro físico de los vasos de una planta vascular, que evite además preferiblemente al menos parcialmente uno o más de los inconvenientes descritos anteriormente. La presente invención puede tener como objeto superar o mejorar al menos una de las desventajas de la técnica anterior, o proporcionar una alternativa útil.

10 Por lo tanto, en un primer aspecto, la invención puede proporcionar un método para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular, especialmente en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos (de los vasos del tejido vascular). El método puede comprender una o más de entre una etapa de excitación acústica (también: "etapa de excitación"), una etapa de detección acústica (también "etapa de detección") y una etapa de análisis. Por lo tanto, en realizaciones, el método puede comprender una etapa de excitación. La etapa de excitación puede comprender proporcionar radiación de excitación acústica (también: "radiación de excitación") a la planta vascular, especialmente en el que la radiación de excitación acústica comprende radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1 - 250 kHz, tal como de entre el intervalo de 10 - 200 kHz. En realizaciones adicionales, el método puede comprender una etapa de detección. La etapa de detección puede comprender detectar radiación de emisión acústica desde la planta vascular, especialmente radiación de emisión acústica desde el intervalo de 1 - 250 kHz, tal como de entre el intervalo de 10 - 200 kHz. La etapa de detección puede comprender además proporcionar una señal relacionada con la emisión. En realizaciones adicionales, el método puede comprender una etapa de análisis. La etapa de análisis puede comprender determinar el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión. En realizaciones, el parámetro físico de los vasos puede comprender una viscosidad, una elasticidad o una dimensión de los vasos, especialmente una elasticidad o una dimensión de los vasos.

25 Por lo tanto, en realizaciones específicas, la invención puede proporcionar un método para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular, en el que el método comprende: una etapa de excitación que comprende proporcionar radiación de excitación acústica a la planta, en el que la radiación de excitación acústica comprende radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1 - 250 kHz; una etapa de detección que comprende detectar emisiones de ultrasonidos desde la planta y proporcionar una señal relacionada con la emisión; y una etapa de análisis que comprende determinar el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos.

35 El método de la invención puede proporcionar el beneficio de que puede obtenerse un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular de manera rápida y no invasiva. Por lo tanto, el parámetro físico de los vasos puede obtenerse sin dañar la planta.

40 En particular, la invención puede proporcionar una nueva plataforma para determinar los parámetros físicos de los vasos del tejido vascular mediante la implementación de un método sonográfico. La invención puede basarse en la constatación de que las emisiones de ultrasonidos registradas de manera remota son una firma de las dimensiones y de la elasticidad de los vasos del xilema y representan sus modos de vibración resonantes. En particular, al registrar la radiación de emisión acústica espontánea o inducida, especialmente la radiación de emisión de ultrasonidos, de la planta, especialmente desde el tejido vascular, pueden obtenerse, de una manera no destructiva, datos relacionados con las dimensiones y/o las elasticidades de los vasos. La invención puede facilitar el fenotipado rápido de plantas in vivo. La invención puede referirse particularmente al envío de un pulso de radiación externo, especialmente un pulso de ultrasonidos, a través del tallo de la planta y registrar la radiación de emisión acústica inducida.

45 En particular, la invención puede proporcionar un método no destructivo para determinar uno o más de entre: un radio de los vasos (xilema), una longitud de los vasos (xilema), una elasticidad de los vasos (xilema) y un espesor de pared (xilema), es decir, en realizaciones, el parámetro físico de los vasos puede comprender uno o más de entre un radio de los vasos (xilema), una longitud de los vasos (xilema), una elasticidad de los vasos (xilema) y un espesor de pared (xilema).

50 La invención se describirá en el presente documento, con propósitos explicativos, principalmente en el contexto de realizaciones relacionadas con la determinación de los parámetros de los vasos del xilema. Será evidente para la persona experta en la técnica que la invención no está limitada a dichas realizaciones, y que la invención puede aplicarse además a la determinación de los parámetros de los vasos del floema.

55 Por lo tanto, la invención puede proporcionar un método para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular (también: "planta").

La expresión "parámetro físico de los vasos" puede hacer referencia especialmente en el presente documento a un parámetro de vaso relacionado con una longitud, un área, un volumen, un espesor, una viscosidad y una elasticidad. La expresión "parámetro físico de los vasos" puede hacer referencia también a múltiples parámetros físicos de los vasos (diferentes). En realizaciones, el parámetro físico de los vasos puede ser un parámetro geométrico.

5 La expresión "planta vascular" puede hacer referencia en el presente documento a cualquier planta que tenga tejido vascular. Además, la expresión "planta vascular" puede hacer referencia en el presente documento a cualquier planta de entre las traqueofitas del clado.

10 El tejido vascular puede ser un tejido (especializado) para distribuir recursos a través de la planta vascular. El tejido vascular puede subdividirse generalmente en el xilema y el floema, que pueden estar estrechamente asociados y frecuentemente pueden estar dispuestos directamente adyacentes uno al otro en una planta vascular, especialmente en un haz vascular. En realizaciones, el tejido vascular puede ser especialmente el xilema. En realizaciones adicionales, el tejido vascular puede ser especialmente el floema.

En realizaciones, el método puede ser un método no destructivo, es decir, el método puede no dañar, especialmente no destruir, la planta vascular. En particular, el método puede aplicarse a una planta vascular completa (viva).

15 El método puede ser especialmente un método in vivo, es decir, el método puede ejecutarse en una planta vascular viva completa en lugar de solo en un extracto de tejido o una planta vascular muerta. La planta vascular puede disponerse en un sustrato, tal como tierra. La planta vascular puede ser especialmente una planta vascular completa. La planta vascular puede ser especialmente una planta vascular viva.

20 En realizaciones, el método puede comprender una o más de entre una etapa de excitación, una etapa de detección y una etapa de análisis.

25 En realizaciones adicionales, el método comprende la etapa de excitación. La etapa de excitación puede comprender proporcionar radiación de excitación acústica a la planta vascular. En particular, la etapa de excitación puede comprender exponer la planta vascular, especialmente el tejido vascular, a la radiación de excitación acústica. La expresión "radiación de excitación acústica" puede hacer referencia en el presente documento a radiación acústica que tiene una frecuencia adecuada para excitar la planta vascular, especialmente a un tejido vascular de la planta vascular. En particular, la radiación de excitación acústica puede comprender una frecuencia adecuada para excitar una resonancia (interna) de la planta vascular, especialmente del tejido vascular, tal como del xilema. Será evidente para la persona experta en la técnica que la frecuencia adecuada para excitar una resonancia (interna) de la planta vascular puede depender del tipo y/o del tamaño de la planta vascular. Por ejemplo, pueden seleccionarse frecuencias relativamente bajas para la radiación de excitación acústica cuando se emplea el método con relación a una planta relativamente grande, tal como un árbol, mientras que pueden seleccionarse frecuencias relativamente grandes cuando el método se emplea con relación a una planta relativamente pequeña. En particular, en realizaciones, la radiación de excitación acústica puede comprender especialmente radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1 -250 kHz, tal como de entre el intervalo de 10 - 200 kHz.

35 En realizaciones, la radiación de excitación acústica puede comprender radiación que tiene una frecuencia de al menos 1 kHz, tal como al menos 5 kHz, especialmente al menos 10 kHz, tal como al menos 20 kHz, especialmente al menos 30 kHz.

40 En realizaciones adicionales, la radiación de excitación acústica puede comprender radiación que tiene una frecuencia (radiación de excitación acústica) de como máximo 500 kHz, especialmente como máximo 250 kHz, tal como, como máximo, 200 kHz, especialmente como máximo 170 kHz, tal como como, como máximo, 150 kHz, especialmente como máximo 130 kHz.

45 En realizaciones adicionales, la frecuencia de radiación de excitación acústica y/o la amplitud de radiación de excitación acústica pueden variarse en el tiempo, especialmente mientras los espectros de radiación emitidos y las variaciones en los mismos se determinan para inferir propiedades de la planta vascular, especialmente del tejido vascular, o para determinar las frecuencias de radiación de excitación acústica a las que la estimulación de la emisión de radiación de emisión acústica por la radiación de excitación acústica es máxima. En realizaciones adicionales, pueden aplicarse pulsos de excitación (por ejemplo, pulsos de bloque) de duración y amplitudes diferentes, especialmente cuando el contenido de frecuencias depende de la anchura de pulso.

50 Puede hacerse referencia a la radiación por encima de 20 kHz generalmente como radiación de ultrasonidos, es decir, radiación con frecuencias más altas que el límite audible superior de la audición humana. En realizaciones adicionales, la radiación de excitación puede ser radiación de excitación de ultrasonidos, es decir, la radiación de excitación puede comprender radiación que tiene una frecuencia en el intervalo de los ultrasonidos.

En realizaciones adicionales, el método puede comprender la etapa de detección. La etapa de detección puede comprender detectar radiación de emisión acústica desde la planta vascular y proporcionar una señal relacionada con

5 la emisión. Especialmente, la etapa de detección puede comprender detectar la radiación de emisión acústica de resonancia desde la planta vascular, especialmente desde el tejido vascular, y proporcionar una señal relacionada con la emisión. Será evidente para la persona experta en la técnica que, estrictamente hablando, la frecuencia medida (u "observada") de la radiación de emisión acústica puede ser ligeramente inferior a la frecuencia resonante real debido a una amortiguación distinta de cero.

10 La expresión "radiación de emisión acústica" puede hacer referencia en el presente documento a la radiación acústica emitida desde la planta vascular, especialmente desde el tejido vascular. En particular, la planta vascular, especialmente el tejido vascular, puede haber sido excitada por radiación de excitación acústica en la etapa de excitación y posteriormente puede emitir radiación de emisión acústica. Sin embargo, la planta vascular, especialmente el tejido vascular, puede emitir también radiación de emisión acústica sin ser excitada específicamente por la radiación de excitación acústica. Por ejemplo, si una planta experimenta estrés hídrico, las burbujas de gas pueden nuclearse en estos vasos, lo que puede resultar en que la planta emita radiación de emisión, especialmente radiación de emisión de ultrasonidos.

15 La expresión "radiación de emisión acústica de resonancia" puede hacer referencia especialmente a radiación emitida desde la planta vascular, especialmente desde el tejido vascular, que coincide con una frecuencia de resonancia (interna) del tejido vascular. En particular, la radiación de excitación acústica puede comprender radiación que tiene una frecuencia de resonancia del tejido vascular, es decir, radiación que tiene una frecuencia que coincide con una frecuencia de vibración natural del tejido vascular, lo que puede causar que el tejido vascular vibre y emita radiación de emisión acústica de resonancia a la frecuencia de resonancia.

20 La radiación de emisión acústica puede comprender radiación que tiene la misma frecuencia que la radiación de excitación acústica. El término "frecuencia" puede hacer referencia también a múltiples frecuencias diferentes. En particular, en realizaciones, la radiación de emisión acústica puede comprender radiación seleccionada de entre el mismo intervalo que la radiación de excitación acústica. Especialmente, la radiación de excitación acústica y la radiación de emisión acústica pueden superponerse en una o más frecuencias.

25 En general, en realizaciones, la radiación de emisión acústica puede seleccionarse de entre el intervalo de 1 - 250 kHz, tal como de entre el intervalo de 10 - 200 kHz.

En realizaciones, la radiación de emisión acústica puede comprender radiación que tiene una frecuencia de al menos 1 kHz, tal como al menos 5 kHz, especialmente al menos 10 kHz, tal como al menos 20 kHz, tal como al menos 30 kHz.

30 En realizaciones adicionales, la radiación de emisión acústica puede comprender radiación que tiene una frecuencia de como máximo 500 kHz, especialmente como máximo 250 kHz, tal como, como máximo, 200 kHz, especialmente como máximo 170 kHz, tal como como, como máximo, 150 kHz, especialmente como máximo 130 kHz.

En realizaciones adicionales, la radiación de emisión puede ser radiación de emisión de ultrasonidos, es decir, la radiación de emisión puede comprender radiación en el intervalo de los ultrasonidos.

35 La expresión "señal relacionada con la emisión" puede hacer referencia en el presente documento a una señal que está relacionada con la radiación de emisión acústica detectada. En particular, la señal relacionada con la emisión puede comprender datos sin procesar y/o procesados relacionados con la radiación de emisión acústica (detectada).

40 En realizaciones adicionales, el método puede comprender la etapa de análisis. La etapa de análisis puede comprender determinar el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión. En particular, la radiación de emisión acústica detectada puede representar uno o más modos de vibración resonantes de las dimensiones y la elasticidad del tejido vascular, tal como de un tejido xilemático. Los modos de vibración resonantes pueden estar relacionados con las dimensiones y la elasticidad del tejido vascular. Por lo tanto, la radiación de emisión acústica detectada puede ser una firma de las dimensiones y de la elasticidad del tejido vascular. El parámetro físico de los vasos puede comprender especialmente una elasticidad o una dimensión de los vasos, especialmente una elasticidad, o especialmente una dimensión de los vasos. En particular, el parámetro físico de los vasos puede comprender una elasticidad o una dimensión de los vasos del tejido vascular, especialmente de un (elemento de) vaso del tejido vascular. En realizaciones, la dimensión de los vasos puede comprender especialmente una longitud de los vasos o un radio de los vasos, especialmente una longitud de los vasos, o especialmente un radio de los vasos.

50 En realizaciones, la etapa de excitación y la etapa de detección pueden superponerse (al menos) parcialmente en el tiempo. Al superponer temporalmente las etapas, el método puede ser más rápido. En particular, las etapas pueden superponerse temporalmente si las frecuencias de resonancia son de interés principal.

En realizaciones adicionales, la etapa de excitación y la etapa de detección pueden separarse temporalmente, es decir, la etapa de excitación puede disponerse temporalmente antes que la etapa de detección. Dichas realizaciones pueden ser particularmente relevantes cuando la etapa de análisis comprende un análisis de amortiguación en el dominio del tiempo, ya que entonces puede necesitarse que la radiación de excitación acústica sea distinguible de la radiación de

emisión acústica detectada en el dominio del tiempo. En particular, la etapa de detección puede disponerse temporalmente con un retardo después de la etapa de excitación, en el que el retardo es igual o mayor que una duración finita (del pulso) de la radiación de excitación acústica.

5 En realizaciones, el tejido vascular puede ser un tejido xilemático, especialmente un tejido xilemático en un tallo de planta, una rama de planta o una raíz de planta, especialmente en un tallo de planta o una rama de planta. En realizaciones adicionales, el tejido vascular puede ser especialmente un tejido xilemático en una raíz de planta (desenterrada).

10 La expresión "rama de planta" puede hacer referencia especialmente en el presente documento a un brote o un tallo que surge desde un eje (principal) de la planta vascular, especialmente un brote o tallo secundario. Por lo tanto, la expresión "rama de planta" no se refiere, por ejemplo, a hojas ni a frutos unidos a la rama de planta.

En realizaciones adicionales, el tejido vascular puede ser un tejido de floema, especialmente un tejido de floema en un tallo de planta, una rama de planta o una raíz de planta, especialmente en un tallo de planta o una rama de planta.

15 En particular, el método, especialmente la etapa de excitación, puede comprender proporcionar radiación de excitación acústica (o "enfocar la radiación de excitación acústica") al tallo de la planta, a la rama de la planta o a la raíz de la planta, especialmente al tallo de la planta o a la rama de la planta, más especialmente al tallo de la planta, o más especialmente a la rama de la planta. En realizaciones adicionales, el método, especialmente la etapa de detección, puede comprender (específicamente) detectar radiaciones de emisión de ultrasonidos desde el tallo de la planta o la rama de la planta, especialmente desde el tallo de la planta, o especialmente desde la rama de la planta.

20 En realizaciones, la planta vascular, especialmente el tallo de la planta, o especialmente la rama de la planta, puede tener un diámetro de tallo seleccionado de entre el intervalo de 0,5 - 20 mm, tal como de entre el intervalo de 1 - 10 mm.

25 En realizaciones, la planta vascular puede ser una planta monocotiledónea o una planta dicotiledónea, especialmente una planta monocotiledónea, o especialmente una planta dicotiledónea. La expresión "planta monocotiledónea" puede hacer referencia especialmente a un miembro de las monocotiledóneas. La expresión "planta dicotiledónea" puede hacer referencia especialmente a un miembro de las dicotiledóneas. En realizaciones adicionales, la planta vascular puede ser una planta herbácea o una planta leñosa. La expresión "planta herbácea" puede hacer referencia especialmente a una planta que tiene un tallo no leñoso, mientras que la expresión "planta leñosa" puede ser especialmente una planta que tiene un tallo leñoso. En realizaciones adicionales, la planta vascular puede ser especialmente una planta dicotiledónea herbácea.

30 Tal como se ha indicado anteriormente, la planta vascular puede emitir también (espontáneamente) cierta radiación de emisión acústica en ausencia de radiación de excitación acústica dedicada, tal como cuando la planta vascular experimenta sequía. Por lo tanto, en realizaciones específicas, la invención puede proporcionar un método para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular, en el que el método comprende: una etapa de detección que comprende detectar emisiones de ultrasonido desde la planta y proporcionar una señal relacionada con la emisión; y una etapa de análisis que comprende determinar el parámetro físico de los  
35 vasos en base a la señal relacionada con la emisión, en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos.

40 En particular, en realizaciones específicas adicionales, la radiación de emisión acústica puede comprender radiación seleccionada de entre el intervalo de 10 - 100 kHz, en el que el tejido vascular es un tejido xilemático en un tallo de planta o rama de planta, y en el que la planta vascular es una planta dicotiledónea herbácea que tiene un diámetro de tallo (del tallo de planta o la rama de planta) seleccionado de entre el intervalo de 1 - 10 mm.

El tejido vascular, especialmente el xilema, puede tener un eje longitudinal. En particular, en general, el eje longitudinal puede ser paralelo a un eje de elongación de un tallo de planta y/o una rama de planta (que comprende el tejido vascular).

45 En realizaciones, la etapa de detección puede comprender detectar radiación de emisión acústica desde la planta vascular en una primera ubicación dispuesta axialmente con respecto al eje longitudinal, es decir, la primera ubicación puede disponerse esencialmente en el eje longitudinal. Dicha disposición puede facilitar la identificación de la radiación, especialmente una onda de sonido, que resuena y se propaga a lo largo de la longitud de los vasos. Las frecuencias pueden estar gobernadas por la longitud de los vasos, mientras que la amortiguación (en el sonido) en el dominio del tiempo puede estar relacionada con los radios de los vasos y/o la viscosidad cinemática de la savia presente en los  
50 vasos.

En particular, especialmente con respecto al xilema, la radiación de emisión acústica medida desde la primera ubicación puede proporcionar información acerca de uno o más de entre una longitud  $L$  de los (elementos de) vasos de xilema, un radio  $R$  de xilema, un módulo  $E$  elástico, una densidad  $\rho$  de la savia (agua), una compresibilidad  $K$  aparente de la savia, un espesor  $h$  de pared de xilema y una viscosidad  $\eta$  dinámica. En particular, la radiación de emisión

acústica detectada en la primera ubicación puede comprender una frecuencia  $f_m$  de orden  $m$  (resonancia) observada, en la que  $f_m$  puede ser (aproximadamente) igual a  $m/2 \cdot v_{efi}/L$ , es decir:

$$f_m \approx \left(\frac{m}{2}\right) \cdot \frac{v_{efi}}{L}$$

en la que  $m$  es el orden de modo, y en la que:

$$v_{efi} \approx \sqrt{\frac{1}{\rho_l} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{K \cdot h \cdot E}\right)^{-1}}$$

5

Además, la radiación de emisión acústica detectada en la primera ubicación puede amortiguarse (en el dominio del tiempo), en el que la amortiguación puede caracterizarse por un tiempo  $\tau_s$  de asentamiento de la radiación de emisión, en la que:

$$R \approx \sqrt{\frac{4 \cdot \eta_l \cdot \tau_s}{\rho_l}}$$

10 Por lo tanto, si, en la primera ubicación, la frecuencia de la radiación de emisión acústica observada desde un tejido vascular es mayor que la de un tejido vascular de referencia, esto puede ser indicativo de que el tejido vascular tiene un valor más alto para uno o más de entre un módulo  $E$  elástico, una compresibilidad  $K$  aparente de la savia, un espesor  $h$  de pared de xilema, o un valor más bajo para uno o más de entre una longitud  $L$  de los (elementos de) vasos de xilema, un radio  $R$  de xilema o una densidad  $\rho_l$  de la savia (agua). De manera similar, si el tiempo  $\tau_s$  de asentamiento de la radiación de emisión acústica observada desde un tejido vascular es mayor que el de un tejido vascular de referencia, esto puede ser indicativo de que el tejido vascular tiene un valor más alto para uno o más de entre el radio del xilema y la densidad  $\rho_l$  de la savia (agua), o de un valor más bajo de la viscosidad  $\eta_l$  dinámica.

20 En realizaciones adicionales, la etapa de detección puede comprender detectar una radiación de emisión acústica desde la planta vascular en una segunda ubicación dispuesta perpendicular (o "dispuesta radialmente") con respecto al eje longitudinal, es decir, la segunda ubicación puede disponerse a lo largo del tallo de la planta (o la rama de la planta) y perpendicular al eje longitudinal. Dicha disposición puede facilitar la identificación de la radiación, especialmente una onda de sonido, que se genera por los modos de vibración de flexión y/o radial de un compuesto de vaso-savia. Las frecuencias correspondientes pueden estar gobernadas por uno o más de entre la longitud, el radio y el módulo elástico de los vasos.

25 En particular, especialmente con respecto al xilema, la radiación de emisión acústica medida desde la segunda ubicación puede proporcionar información relacionada con uno o más de entre una longitud  $L$  de los (elementos) de vaso del xilema, un radio  $R$  del xilema, un módulo  $E$  elástico, una densidad  $\rho_{xilema}$  de masa del xilema y una viscoelasticidad  $\eta_{sólida}$  sólida. En particular, la radiación de emisión acústica detectada en la segunda ubicación puede comprender una frecuencia  $f_n$  de orden  $n$  (resonancia) observada, en la que:

$$f_n \approx \left(\frac{k_T}{4\pi}\right) \cdot \left(\frac{R}{L^2}\right) \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho_{xilema}}}$$

30

en la que  $k_T$  es una constante de modo, es decir, un pre-factor que ocurre en la expresión de la frecuencia de resonancia de una viga vibratoria. El valor puede depender del orden " $n$ ". En particular, en realizaciones, para  $n = 1, 2$  o  $3$ ,  $k_T$  puede ser 4,73, 7,8532 o 10,996 respectivamente. Para  $n > 3$ ,  $k_T$  puede ser aproximadamente  $(n+0,5) \cdot \pi$ . La constante de modo correcta puede conocerse identificando qué conjunto de frecuencias características teóricas coincide estrechamente con el conjunto observado de frecuencias características. Además, la radiación de emisión acústica detectada en la primera ubicación puede amortiguarse (en el dominio del tiempo), en el que la amortiguación puede caracterizarse por un tiempo  $\tau_s$  de asentamiento, en el que:

35

$$\tau_s \approx \frac{\eta_{sólida}}{E}$$

40 Por lo tanto, si, en la segunda ubicación, la frecuencia de la radiación de emisión acústica observada desde un tejido vascular es mayor que la de un tejido vascular de referencia, esto puede ser indicativo de que el tejido vascular tiene un valor más alto para uno o más de entre el módulo  $E$  elástico y un radio  $R$  del xilema, o un valor más bajo para uno o más de entre una longitud  $L$  de los (elementos) de vaso de xilema y una densidad  $\rho_{xilema}$  de masa del xilema. De

manera similar, si el tiempo  $\tau_s$  de asentamiento de la radiación de emisión acústica observada desde un tejido vascular es mayor que el de un tejido vascular de referencia, esto puede ser indicativo de que el tejido vascular tiene un valor más alto para la viscoelasticidad  $\eta_{sólida}$  sólida, o un valor más bajo para el módulo E elástico.

5 Será evidente para la persona experta en la técnica que los parámetros físicos de los vasos pueden variar adicionalmente como una función de otras características (medibles). Por ejemplo, el módulo elástico y la densidad de masa del xilema pueden depender también del contenido de agua/humedad del tejido xilemático.

En particular, en realizaciones adicionales, la etapa de detección puede comprender detectar radiación de emisión acústica desde la planta vascular tanto en la primera ubicación como en la segunda ubicación.

10 En realizaciones, la etapa de excitación puede comprender proporcionar radiación de excitación acústica mediante un pulso, especialmente en el que el pulso tiene una duración de pulso que es mayor que un tiempo de asentamiento característico debido a la amortiguación en el tejido vascular. En particular, la duración del pulso puede ser mayor de 1 ms. En realizaciones adicionales, la duración del pulso puede seleccionarse de entre el intervalo de 0,5 - 10 ms, tal como de entre el intervalo de 1-10 ms. En realizaciones adicionales, la duración del pulso puede ser de al menos 0,5 ms, tal como al menos 1 ms, especialmente al menos 1,1 ms, tal como al menos 1,2 ms, especialmente al menos 1,5 ms, tal como al menos 2 ms. En realizaciones adicionales, la duración del pulso puede ser como máximo 20 ms, tal como, como máximo, 15 ms, especialmente al menos 10 ms, tal como máximo 5 ms, especialmente como máximo 3 ms, tal como máximo 2 ms. En realizaciones adicionales, la etapa de excitación puede comprender proporcionar el pulso mediante una excitación escalonada o un pulso rectangular estrecho. El tiempo de asentamiento puede determinarse especialmente ajustando una envolvente de amplitud a una señal en el dominio del tiempo con una única función exponencial.

20 En realizaciones adicionales, el pulso puede tener una duración de pulso menor que el tiempo de vuelo (tiempo de propagación) de la radiación de excitación acústica a través de la planta, tal como a través del tallo de la planta, especialmente a través del tejido vascular. Dicha realización puede ser beneficiosa, ya que puede prevenir una superposición temporal entre la radiación de excitación acústica y la radiación de emisión acústica emitida desde la planta. En particular, dichas realizaciones pueden ser beneficiosas cuando la amortiguación (a lo largo del tiempo) de la radiación de emisión acústica se usa para determinar el parámetro físico de los vasos.

25 En particular, la etapa de excitación puede comprender proporcionar radiación de excitación acústica mediante un pulso que tiene una duración  $T_{ON}$  de pulso, y solo puede proporcionarse un único pulso durante un tiempo  $T_{retardo}$  de retardo. La radiación de excitación acústica puede tener un tiempo  $\tau$  de asentamiento de radiación de excitación acústica, que puede determinarse ajustando una envolvente de amplitud a una señal en el dominio del tiempo (observada) con una única función exponencial. De manera similar, la radiación de emisión acústica puede tener un tiempo  $\tau_s$  de asentamiento de radiación de emisión acústica, que puede determinarse ajustando una envolvente de amplitud a una señal en el dominio del tiempo (observada) con una única función exponencial. En realizaciones,  $T_{retardo} > \tau_s$ , lo que puede proporcionar el beneficio de que la excitación del tejido vascular debido a un primer pulso puede (en su mayoría) asentarse antes de que el siguiente pulso excite el tejido vascular. En realizaciones adicionales,  $\tau > \tau_s$ , lo que puede servir para prevenir que el tiempo de asentamiento en la respuesta de la planta esté limitado por el tiempo de asentamiento de la radiación de excitación acústica. En realizaciones adicionales,  $T_{ON} < 1/f_{planta}$ , en la que  $f_{planta}$  es la frecuencia de resonancia más alta de interés, de manera que un ancho de banda de la radiación de excitación acústica se extienda por encima de la frecuencia  $f_{planta}$  de resonancia más alta de interés.

30 En realizaciones, la etapa de análisis puede comprender ajustar al menos parte de la señal relacionada con la emisión a un modelo de modos de flexión (o: "modos de flexión") de una viga cilíndrica (véase también más adelante), y determinar el parámetro físico de los vasos en base (al menos parcialmente) al modelo. La viga cilíndrica puede representar especialmente el tejido vascular.

35 En realizaciones adicionales, la etapa de análisis puede comprender ajustar una curva de decaimiento exponencial a (la amplitud de) al menos parte de la señal relacionada con la emisión (en el dominio del tiempo). La etapa de análisis puede comprender además determinar un parámetro de decaimiento en base a la curva de decaimiento exponencial, especialmente en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base al parámetro de decaimiento. En particular, el parámetro de decaimiento puede alimentarse (o "proporcionarse" o "incorporarse") al modelo, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base al modelo, especialmente en base al modelo (parametrizado) con el parámetro de decaimiento. En dichas realizaciones, el parámetro físico de los vasos puede comprender especialmente uno o más de entre un radio del tejido vascular, una viscosidad de la savia y una (visco)elasticidad del tejido vascular, más especialmente uno o más de entre un radio de los vasos del xilema, una viscosidad de la savia y una (visco)elasticidad del xilema.

40 En realizaciones, la radiación de emisión acústica detectada puede convertirse al dominio de la frecuencia, tal como mediante una transformación de Fourier. En particular, la etapa de análisis puede comprender convertir los datos en la señal relacionada con la emisión al dominio de la frecuencia.

En realizaciones adicionales, la etapa de análisis puede comprender determinar uno o más picos en al menos parte de la señal relacionada con la emisión en el dominio de la frecuencia, especialmente en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base a los uno o más picos. En particular, (las frecuencias y/o amplitudes correspondientes a) los uno o más picos pueden alimentarse (o "proporcionarse" o "incorporarse") al modelo, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base al modelo, especialmente en base al modelo (parametrizado) en base a los uno o más picos. En dichas realizaciones, el parámetro físico de los vasos puede comprender especialmente uno o más de entre una longitud del elemento de vaso del tejido vascular, y un módulo de Young (del tejido vascular), especialmente una longitud del elemento de vaso del xilema, y un módulo de Young (del xilema).

La expresión "elemento de vaso del xilema" puede hacer referencia a un compartimento tubular (o "elemento" comprendido por el vaso del xilema, es decir, el vaso del xilema puede estar compuesto por una red en serie de compartimentos tubulares. Los elementos de vaso del xilema de un vaso del xilema pueden estar separados por placas de perforación. Por lo tanto, un elemento de vaso del xilema puede estar definido por (la presencia de) placas de perforación en cada extremo. Los elementos de vaso del xilema pueden definir la unidad de resonancia para los ultrasonidos. Por lo tanto, en realizaciones, el parámetro físico de los vasos puede ser un parámetro físico de los vasos de un elemento de vaso del xilema. Las placas de perforación pueden modelarse como límites reflectantes no ideales (con pérdida).

El parámetro físico de los vasos puede ser indicativo del rendimiento de la planta, que puede relacionarse además con el bienestar de la planta. En particular, el parámetro físico de los vasos puede ser indicativo de la calidad de una o más de entre las condiciones de crecimiento de las plantas y/o la genética de las plantas, y especialmente también la interacción entre las condiciones de crecimiento de las plantas y la genética de las plantas (Genética x Interacción con el medio ambiente). Por ejemplo, el parámetro físico de los vasos puede sugerir que la planta vascular tiene un exceso o una falta, por ejemplo, de agua, un nutriente o iluminación.

Por lo tanto, en realizaciones, el método puede comprender además controlar una condición de cultivo de plantas en base al parámetro físico de los vasos, especialmente en el que la condición de cultivo de plantas se selecciona de entre el grupo que comprende un régimen de riego, un régimen de iluminación y un régimen de nutrientes.

En realizaciones adicionales, el método puede comprender determinar (los valores de) el parámetro físico de los vasos para múltiples plantas vasculares, en el que el método comprende además seleccionar una o más plantas vasculares de entre las múltiples plantas vasculares para la reproducción en base a (los valores de) el parámetro físico de los vasos. Por ejemplo, el método puede emplearse para la reproducción de plantas vasculares resistentes a la sequía mediante la exposición de múltiples plantas vasculares a la sequía, y: determinar el parámetro físico de los vasos de las múltiples plantas vasculares en uno o más puntos en el tiempo; determinar un parámetro de rendimiento de las plantas vasculares en base al parámetro físico de los vasos; y seleccionar una o más plantas vasculares de entre las múltiples plantas vasculares para la reproducción en base al parámetro de rendimiento (o directamente en base al parámetro físico de los vasos).

La planta vascular, especialmente el tejido vascular, puede tener múltiples frecuencias de resonancia. Por lo tanto, el método, especialmente la etapa de excitación, puede comprender proporcionar radiación de excitación acústica que comprende radiación que tiene múltiples frecuencias, especialmente múltiples frecuencias seleccionadas de entre el intervalo de 1 - 250 kHz. De manera similar, el método, especialmente la etapa de detección, puede comprender detectar radiación de emisión acústica que comprende radiación que tiene múltiples frecuencias, especialmente múltiples frecuencias seleccionadas de entre el intervalo de 1 - 250 kHz.

En realizaciones, el método, especialmente la etapa de excitación, puede comprender proporcionar radiación de excitación acústica que comprende radiación de banda ancha que tiene una o más frecuencias en el intervalo de 1 - 250 kHz, tal como en el intervalo de 10 - 200 kHz, especialmente en el intervalo de 10 - 150 kHz. En particular, el método puede comprender proporcionar radiación de excitación acústica de banda ancha que comprende una o más frecuencias en el intervalo de 1 - 250 kHz, especialmente en el intervalo de 10 - 150 kHz.

En realizaciones, el método puede comprender variar la frecuencia de la radiación en la radiación de excitación acústica y/o en la radiación de emisión acústica. En particular, el método puede comprender ejecutar un barrido de frecuencia. La expresión "barrido de frecuencia" puede hacer referencia especialmente a la variación (temporal) de una frecuencia de excitación o emisión. Un barrido de frecuencia puede ser perspicaz en cuanto a la respuesta de la planta vascular con respecto a frecuencias específicas.

Por lo tanto, en realizaciones adicionales, la etapa de excitación puede comprender un barrido de frecuencia de excitación desde una primera frecuencia a una segunda frecuencia, es decir, en el que la frecuencia (de la radiación) de la radiación de excitación acústica se varía durante una o más etapas de excitación. En particular, el método puede comprender múltiples etapas de excitación, en el que la radiación de excitación acústica de etapas de excitación diferentes comprende frecuencias diferentes.

En particular, el método puede comprender además una o más etapas de detección, especialmente en las que cada etapa de excitación es seguida por una etapa de detección respectiva. Por lo tanto, el método puede comprender múltiples conjuntos de etapas, en el que cada conjunto comprende una etapa de excitación y una etapa de detección. En realizaciones adicionales, cada conjunto puede comprender además una etapa de análisis. Sin embargo, el método puede comprender también una única etapa de análisis (continua) para analizar los datos relacionados con las emisiones de las múltiples etapas de detección.

Por lo tanto, en realizaciones adicionales, el método puede comprender múltiples (conjuntos que comprenden respectivas) etapas de excitación y etapas de detección, y una (única) etapa de análisis.

En realizaciones, solo puede proporcionarse un único pulso durante un tiempo  $T_{\text{retardo}}$  de retardo, es decir, dos pulsos consecutivos, especialmente proporcionados en etapas de excitación consecutivas, pueden estar separados en el tiempo por un tiempo  $T_{\text{retardo}}$  de retardo. En realizaciones adicionales,  $T_{\text{retardo}}$  puede ser mayor que un tiempo  $\tau_s$  de asentamiento de radiación de emisión acústica. En realizaciones adicionales, el tiempo  $T_{\text{retardo}}$  de retardo puede seleccionarse de entre el intervalo de 0,5 - 10 ms, tal como de entre el intervalo de 1-10 ms. En realizaciones adicionales,  $T_{\text{retardo}}$  puede ser de al menos 0,5 ms, tal como al menos 1 ms, especialmente al menos 1,1 ms, tal como al menos 1,2 ms, especialmente al menos 1,5 ms, tal como al menos 2 ms. De manera similar, en realizaciones adicionales, la etapa de detección puede comprender un barrido de frecuencia de emisión desde la primera frecuencia hasta la segunda frecuencia, es decir, la etapa de detección puede comprender la realización de un barrido de un perfil de pulso emitido. En particular, el barrido de frecuencia de emisión puede comprender variar una frecuencia de detección durante una o más etapas de detección.

En realizaciones adicionales, la primera frecuencia y la segunda frecuencia pueden seleccionarse de entre el intervalo de 1-250 kHz, tal como de entre el intervalo de 10-150 kHz. La primera frecuencia y la segunda frecuencia pueden estar especialmente separadas por al menos 5 kHz, tal como separadas por al menos 10 kHz, especialmente separadas por al menos 20 kHz, tal como separadas por al menos 50 kHz.

En un segundo aspecto, la invención puede proporcionar además un sistema para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular. El sistema puede comprender un dispositivo de radiación acústica (también "dispositivo de radiación"), especialmente un dispositivo de ultrasonidos, y un sistema de control. En realizaciones, el dispositivo de radiación acústica puede comprender un dispositivo de generación de radiación, especialmente un dispositivo de generación de ultrasonidos. En realizaciones adicionales, el dispositivo de radiación acústica puede comprender un dispositivo de detección de radiación, especialmente un dispositivo de detección de ultrasonidos. En realizaciones específicas, el dispositivo de generación de radiación y el dispositivo de detección de radiación pueden ser el mismo dispositivo. En realizaciones, el sistema puede tener un modo operativo. El modo operativo puede comprender una o más de entre una etapa de excitación, una etapa de detección y una etapa de análisis. En realizaciones, el modo operativo puede comprender la etapa de excitación. En la etapa de excitación, el dispositivo de radiación acústica puede estar configurado para proporcionar radiación de excitación acústica (a la planta vascular), especialmente en el que la radiación de excitación acústica comprende radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1-250 kHz, tal como de entre el intervalo de 10 - 150 kHz. En realizaciones adicionales, el modo operativo puede comprender la etapa de detección. En la etapa de detección, el dispositivo de radiación acústica puede estar configurado para detectar radiación de emisión acústica (de resonancia) (desde la planta vascular) y para proporcionar una señal relacionada con la emisión al sistema de control. En realizaciones adicionales, el modo operativo puede comprender una etapa de análisis. En la etapa de análisis, el sistema de control puede estar configurado para determinar el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, especialmente en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos.

En realizaciones, el dispositivo de generación de radiación puede estar configurado especialmente para proporcionar radiación de excitación acústica que comprende radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1 - 250 kHz, tal como de entre el intervalo de 10 - 200 kHz. En realizaciones adicionales, el dispositivo de generación de radiación puede estar configurado para proporcionar radiación de excitación acústica que comprende radiación que tiene una frecuencia de al menos 1 kHz, tal como al menos 5 kHz, especialmente al menos 10 kHz, tal como al menos 20 kHz, tal como al menos 30 kHz. En realizaciones adicionales, el dispositivo de generación de radiación puede estar configurado para proporcionar radiación de excitación acústica que comprende radiación que tiene una frecuencia de como máximo 500 kHz, especialmente como máximo 250 kHz, tal como, como máximo, 200 kHz, especialmente como máximo 170 kHz, tal como, como máximo, 150 kHz, especialmente como máximo 130 kHz.

En realizaciones específicas, el dispositivo de radiación acústica puede comprender un dispositivo de detección de radiación. En realizaciones adicionales, el dispositivo de radiación acústica puede ser un dispositivo de detección de radiación.

En realizaciones, el dispositivo de detección de radiación puede estar configurado especialmente para detectar radiación de emisión acústica que comprende radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de

1 - 250 kHz, tal como de entre el intervalo de 10 - 200 kHz. En realizaciones adicionales, el dispositivo de detección de radiación puede estar configurado para detectar radiación de emisión acústica que comprende radiación que tiene una frecuencia de al menos 1 kHz, tal como al menos 5 kHz, especialmente al menos 10 kHz, tal como al menos 20 kHz, tal como al menos 30 kHz. En realizaciones adicionales, el dispositivo de detección de radiación puede estar configurado para detectar radiación de emisión acústica que comprende radiación que tiene una frecuencia de como máximo 500 kHz, especialmente como máximo 250 kHz, tal como, como máximo, 200 kHz, especialmente como máximo 170 kHz, tal como, como máximo, 150 kHz, especialmente como máximo 130 kHz.

En realizaciones específicas, la invención puede proporcionar un sistema para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular, en el que el sistema comprende un dispositivo de radiación acústica y un sistema de control, en el que el sistema tiene un modo operativo, en el que el modo operativo comprende: una etapa de excitación que comprende que el dispositivo de radiación acústica proporcione radiación de excitación acústica a la planta vascular, en el que la radiación de excitación acústica comprende radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1-250 kHz; una etapa de detección que comprende que el dispositivo de radiación acústica detecte radiación de emisión acústica desde la planta vascular y que proporcione una señal relacionada con la emisión al sistema de control; y una etapa de análisis que comprende que el sistema de control determine el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos.

En realizaciones, el dispositivo de generación de radiación y el dispositivo de detección de radiación pueden ser un único dispositivo.

El sistema puede estar configurado especialmente para ejecutar el método de la invención.

Por lo tanto, en realizaciones específicas, la invención puede proporcionar un sistema para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular, en el que el sistema comprende un dispositivo de radiación acústica y un sistema de control, en el que el sistema tiene un modo operativo, en el que el modo operativo comprende: una etapa de detección que comprende que el dispositivo de radiación acústica detecte la radiación de emisión acústica desde la planta vascular y proporcione una señal relacionada con la emisión al sistema de control; y una etapa de análisis que comprende que el sistema de control determine el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos. En realizaciones adicionales, la radiación de emisión acústica puede comprender radiación seleccionada de entre el intervalo de 10 - 100 kHz, el tejido vascular puede ser un tejido xilemático en un tallo de una planta, una rama de una planta o una raíz de una planta (si está aislada del suelo), especialmente un tejido xilemático en un tallo de planta o una rama de planta, y la planta vascular puede ser una planta dicotiledónea herbácea que tiene un diámetro de tallo (del tallo de la planta o la rama de la planta) seleccionado de entre el intervalo de 1-10 mm.

Por lo tanto, en realizaciones, el dispositivo de radiación acústica, especialmente el dispositivo de detección de radiación, puede estar configurado para detectar radiación de emisión acústica en el intervalo de 1 - 250 kHz, tal como en el intervalo de 10 - 200 kHz.

En realizaciones adicionales, el dispositivo de radiación acústica, especialmente el dispositivo de detección de radiación, puede tener un tiempo de asentamiento característico que es mayor que el tiempo de asentamiento (debido a la amortiguación) del tejido vascular, especialmente al menos 5 veces mayor que el tiempo de asentamiento, tal como al menos 10 veces mayor que el tiempo de asentamiento.

En realizaciones, el sistema puede comprender un elemento de fijación a tallo configurado para fijar el dispositivo de radiación acústica a un tallo de planta o una rama de planta de la planta vascular, especialmente a un tallo de planta, o especialmente a una rama de planta. En dichas realizaciones, el modo operativo puede comprender proporcionar radiación de excitación al tallo de la planta o a la rama de la planta y detectar radiación de emisión acústica desde el tallo de la planta o la rama de la planta, especialmente a y desde el tallo de la planta, o especialmente a y desde la rama de la planta.

En realizaciones adicionales, el dispositivo de radiación acústica puede comprender un dispositivo de detección de radiación axial y/o un dispositivo de detección de radiación radial, especialmente un dispositivo de detección de radiación axial, o especialmente un dispositivo de detección de radiación radial. En dichas realizaciones, en el modo operativo: el dispositivo de detección de radiación axial puede estar dispuesto en una primera ubicación dispuesta axialmente a lo largo del eje longitudinal; y/o el dispositivo de detección de radiación axial puede estar dispuesto en una segunda ubicación dispuesta perpendicular al eje longitudinal.

En realizaciones adicionales, el sistema puede comprender además un sitio de medición configurado para alojar la planta vascular, en el que el dispositivo de radiación acústica comprende un dispositivo de detección de radiación axial dispuesto en una primera ubicación (en el sitio de medición) dispuesta axialmente a lo largo del eje longitudinal; y/o en el que el dispositivo de radiación acústica comprende un dispositivo de detección de radiación axial dispuesto en una

segunda ubicación (en el sitio de medición) dispuesta perpendicular al eje longitudinal.

5 En realizaciones adicionales, el sistema puede estar configurado para mover el dispositivo de radiación acústica con relación a la planta vascular, especialmente para realizar mediciones en múltiples ubicaciones. Por lo tanto, en realizaciones, en la etapa de detección, el sistema puede mover el dispositivo de radiación acústica a múltiples posiciones con relación a la planta vascular, tal como a la primera ubicación y a la segunda ubicación. Por lo tanto, en realizaciones, el dispositivo de radiación acústica, especialmente el dispositivo de detección de radiación, puede disponerse en un brazo robótico.

10 En realizaciones, la etapa de excitación puede comprender que el dispositivo de radiación acústica proporcione la radiación de excitación acústica mediante un pulso. En realizaciones adicionales, el pulso puede tener una duración de pulso que es mayor que un tiempo de asentamiento característico del tejido vascular. En realizaciones adicionales, el pulso puede tener una duración de pulso menor que un tiempo de vuelo de la radiación de excitación acústica a través del tejido vascular.

15 En realizaciones, el dispositivo de radiación acústica, especialmente el dispositivo de generación de radiación, puede estar configurado para proporcionar radiación de banda ancha. Por lo tanto, en realizaciones, la radiación de excitación acústica puede comprender radiación de banda ancha, especialmente radiación de banda ancha que tiene una o más frecuencias en el intervalo de 1 - 250 kHz, especialmente en el intervalo de 10 - 150 kHz. Por lo tanto, en realizaciones adicionales, la radiación de excitación acústica puede ser radiación de excitación acústica de banda ancha que tiene una o más frecuencias en el intervalo de 1 - 250 kHz.

20 En realizaciones, la etapa de análisis puede comprender que el sistema de control ajuste al menos parte de la señal relacionada con la emisión a un modelo de modos de flexión de una viga cilíndrica y determine el parámetro físico de los vasos en base al modelo.

25 En realizaciones adicionales, la etapa de análisis puede comprender que el sistema de control ajuste una curva de decaimiento exponencial a al menos parte de la señal relacionada con la emisión y determine un parámetro de decaimiento, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base al parámetro de decaimiento, especialmente en el que el parámetro físico de los vasos comprende uno o más de entre un radio de los vasos del xilema, una viscosidad de la savia y una viscoelasticidad del xilema.

30 En realizaciones adicionales, la etapa de análisis puede comprender que el sistema de control determine uno o más picos en al menos parte de la señal relacionada con la emisión en el dominio de la frecuencia, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base a los uno o más picos, y especialmente en el que el parámetro físico de los vasos comprende uno o más de entre una longitud del elemento de vaso del xilema y un módulo de Young.

35 En realizaciones, el modo operativo puede comprender una etapa de ejecución, en la que la etapa de ejecución comprende que el sistema de control controle una condición de cultivo de plantas (de la planta vascular) en base al parámetro físico de los vasos, en el que la condición de cultivo de plantas se selecciona de entre el grupo que comprende un régimen de riego, un régimen de iluminación y un régimen de nutrientes. Por lo tanto, en realizaciones, el sistema puede comprender o puede estar acoplado funcionalmente a un sistema de cultivo de plantas, especialmente en el que el sistema de cultivo de plantas está configurado para controlar uno o más de entre (a) agua, (b) iluminación y (c) nutrientes proporcionados a la planta vascular.

40 En realizaciones, la etapa de excitación puede comprender que el dispositivo de radiación acústica proporcione un barrido de frecuencia de excitación desde una primera frecuencia hasta una segunda frecuencia. En realizaciones adicionales, la etapa de detección puede comprender que el dispositivo de radiación acústica proporcione un barrido de frecuencia de emisión desde la primera frecuencia hasta la segunda frecuencia. En dichas realizaciones, la primera frecuencia y la segunda frecuencia pueden seleccionarse especialmente de entre el intervalo de 1-250 kHz.

45 En un aspecto adicional, la invención puede proporcionar un producto de programa informático que comprende instrucciones de programa para su ejecución en un sistema de control acoplado funcionalmente a un sistema según la invención, en el que las instrucciones, cuando son ejecutadas por el sistema de control, causan que el sistema realice el método según la invención.

En un aspecto adicional, la invención puede proporcionar un portador de datos que contiene instrucciones de programa que, cuando son ejecutadas por un sistema de control acoplado funcionalmente a un sistema según la invención, causan que el sistema realice el método según la invención.

50 En un aspecto adicional, la invención puede proporcionar un uso de radiación de emisión acústica desde una planta vascular emitida por la planta vascular para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en la planta vascular, especialmente en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos.

Por lo tanto, la invención puede proporcionar el uso de radiación de emisión acústica para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en una planta vascular, en el que la radiación de emisión acústica es emitida por la planta vascular.

5 En realizaciones, la radiación de emisión acústica puede tener una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1 - 250 kHz.

En realizaciones adicionales, la planta vascular, especialmente el tejido vascular, se expone a radiación de excitación acústica (seleccionada) de manera que la planta vascular emita radiación de emisión acústica.

En realizaciones adicionales, la radiación de emisión acústica es emitida naturalmente por la planta vascular.

10 En realizaciones adicionales, la planta vascular puede encontrarse en un estado de estrés. En particular, la planta vascular puede emitir naturalmente radiación de emisión acústica en un estado de estrés, tal como debido a la escasez de agua. Por lo tanto, en realizaciones adicionales, la planta vascular puede encontrarse en un estado de estrés como resultado de una sequía.

15 En realizaciones adicionales, el uso puede comprender detectar la radiación de emisión acústica con el sistema según la invención. En realizaciones adicionales, el uso puede comprender detectar la radiación de emisión acústica con un dispositivo de radiación acústica, más especialmente con un dispositivo de detección de radiación.

20 El término "etapa" y términos similares usados en el presente documento pueden hacer referencia a un período (de tiempo) (también "fase") de un método y/o de un modo operativo. Las diferentes etapas pueden superponerse (parcialmente) (en el tiempo). Por ejemplo, la etapa de excitación puede iniciarse, en general, antes de la etapa de detección, pero puede superponerse parcialmente en el tiempo con la misma. Sin embargo, por ejemplo, la etapa de detección puede completarse típicamente antes de la etapa de análisis. Será evidente para la persona experta en la técnica cómo pueden disponerse en el tiempo, de manera beneficiosa, las etapas. Por ejemplo, la etapa de excitación puede ocurrir (completamente) antes de la etapa de detección, de manera que la etapa de análisis puede comprender un análisis de amortiguación de la radiación de emisión acústica en el dominio del tiempo. Por lo tanto, en realizaciones, la etapa de excitación y la etapa de detección pueden estar separadas en el tiempo.

25 El sistema, especialmente el sistema de control, puede tener un modo operativo. La expresión "modo operativo" puede indicarse también como "modo de control". El sistema, o aparato, o dispositivo (véase también más adelante) puede ejecutar una acción en un "modo" o "modo operativo" o "modo de operación". De manera similar, en un método, una acción, fase o etapa puede ejecutarse en un "modo" o "modo operativo" o "modo de operación". Esto no excluye que el sistema, o aparato, o dispositivo pueda estar adaptado también para proporcionar otro modo operativo, o múltiples otros modos operativos. De manera similar, esto no excluye que antes de ejecutar el modo y/o después de ejecutar el modo puedan ejecutarse uno o más modos diferentes. Sin embargo, en realizaciones puede estar disponible un sistema de control (véase también más adelante), que está adaptado para proporcionar al menos el modo operativo. Si hubiera disponibles otros modos, la elección de dichos modos puede ejecutarse especialmente mediante una interfaz de usuario, aunque pueden ser posibles también otras opciones, tales como ejecutando un modo en función de una señal de sensor o un esquema (temporal). En realizaciones, el modo operativo puede hacer referencia también a un sistema, o aparato, o dispositivo, que solo puede funcionar en un único modo operativo (es decir, "activado", sin capacidad de ajuste adicional).

30

35

40 El término "controlar" y términos similares en el presente documento pueden hacer referencia especialmente al menos a determinar el comportamiento o supervisar el funcionamiento de un elemento. Por lo tanto, en el presente documento "controlar" y términos similares pueden hacer referencia, por ejemplo, a imponer un comportamiento al elemento (determinar el comportamiento o supervisar el funcionamiento de un elemento), etc., tal como, por ejemplo, medir, mostrar, accionar, abrir, cambiar, cambiar la temperatura, etc. Más allá de eso, el término "controlar" y términos similares pueden incluir además supervisar. Por lo tanto, el término "controlar" y términos similares pueden incluir imponer un comportamiento a un elemento y también imponer un comportamiento a un elemento y supervisar el elemento. El control del elemento puede realizarse con un sistema de control. De esta manera, el sistema de control y el elemento pueden estar acoplados funcionalmente, al menos temporal o permanentemente. El elemento puede comprender el sistema de control. En realizaciones, el sistema de control y el elemento pueden no estar físicamente acoplados. El control puede realizarse mediante un control por cable y/o inalámbrico. La expresión "sistema de control" puede hacer referencia también a múltiples sistemas de control diferentes, que especialmente están acoplados funcionalmente, y de los cuales, por ejemplo, un sistema de control puede ser un sistema de control y uno o más de entre otros sistemas de control pueden ser sistemas de control esclavos.

45

50

55 Las realizaciones descritas en el presente documento no están limitadas a un solo aspecto de la invención. Por ejemplo, una realización que describe el método puede, por ejemplo, hacer referencia además al sistema, especialmente a un modo operativo del sistema, o especialmente al sistema de control. De manera similar, una realización del sistema que describe una operación del sistema puede hacer referencia además a realizaciones del

método. En particular, una realización del método que describe una operación (del sistema) puede indicar que, en realizaciones, el sistema puede configurarse y/o puede ser adecuado para la operación.

Breve descripción de los dibujos

5 A continuación, las realizaciones de la presente invención se describirán, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos esquemáticos adjuntos, en los que los símbolos de referencia correspondientes indican partes correspondientes, y en los que: La Fig. 1 representa esquemáticamente realizaciones del método y del sistema de la invención. La Fig. 2 representa esquemáticamente un tejido vascular y una representación de modelo de viga resonante del mismo. Las Figs. 3A-E representan esquemáticamente los datos experimentales obtenidos usando el método de la invención. Los dibujos esquemáticos no están necesariamente a escala.

10 Descripción detallada de las realizaciones

La Fig. 1 representa esquemáticamente el método y el sistema 1000 de la invención.

En particular, la Fig. 1 representa esquemáticamente el método para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido 20 vascular en una planta 10 vascular. El método puede comprender una etapa de excitación, una etapa de detección y/o una etapa de análisis.

15 La etapa de excitación puede comprender proporcionar radiación 111 de excitación acústica a la planta 10 vascular, especialmente en la que la radiación 111 de excitación acústica comprende radiación que tiene una frecuencia que coincide con una frecuencia de resonancia del tejido 20 vascular, especialmente de un tejido xilemático. En realizaciones, la radiación 111 de excitación acústica puede comprender radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1- 250 kHz.

20 La etapa de detección puede comprender radiación 121 de emisión acústica (resonancia) desde la planta 10 vascular, especialmente desde el tejido 20 vascular. La etapa de detección puede comprender además proporcionar una señal relacionada con la emisión.

25 La etapa de análisis puede comprender determinar el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, especialmente en el que el parámetro físico de los vasos comprende una viscosidad, una elasticidad o una dimensión de los vasos (del tejido 20 vascular), especialmente una elasticidad o una dimensión de los vasos.

En realizaciones, el tejido 20 vascular puede ser un tejido xilemático en un tallo 11 de planta, en una rama 12 de planta o en una raíz 13 de planta.

30 El tejido 20 vascular puede tener un eje A longitudinal. En particular, el eje A longitudinal puede ser paralelo a un eje longitudinal del tallo 11 de la planta. En la realización representada, la etapa de detección comprende: radiación 121 de emisión acústica desde la planta 10 vascular en una primera ubicación dispuesta axialmente con respecto al eje A longitudinal; y radiación 121 de emisión acústica desde la planta vascular en una segunda ubicación dispuesta perpendicular con respecto al eje A longitudinal.

35 En realizaciones adicionales, se cumple una o más de entre: que la etapa de excitación comprende un barrido de frecuencia de excitación desde una primera frecuencia a una segunda frecuencia; y que la etapa de detección comprende un barrido de frecuencia de emisión desde la primera frecuencia a la segunda frecuencia; especialmente en el que la primera frecuencia y la segunda frecuencia se seleccionan de entre el intervalo de 1-250 kHz.

En realizaciones adicionales, el método puede comprender determinar el parámetro físico de los vasos para múltiples plantas 10 vasculares, en el que el método comprende seleccionar una o más plantas 10 vasculares de entre las múltiples plantas 10 vasculares para la reproducción en base a los parámetros físicos de los vasos.

40 La Fig. 1 representa además esquemáticamente un sistema 1000 para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido 20 vascular en una planta 10 vascular, en el que el sistema 100 comprende un dispositivo 100 de radiación acústica y un sistema 300 de control. El dispositivo de radiación acústica puede comprender especialmente uno o más de entre un dispositivo 110 de generación de radiación y un dispositivo 120 de detección de radiación, especialmente un generador de ultrasonidos y un sensor de ultrasonidos. El sistema 1000, especialmente el sistema 300 de control, puede tener un modo operativo. El modo operativo puede comprender especialmente una o más de entre una etapa de excitación, una etapa de detección y una etapa de análisis.

50 En la etapa de excitación, el dispositivo 110 de generación de radiación puede estar configurado para proporcionar radiación 111 de excitación acústica a la planta 10 vascular, especialmente al tejido 20 vascular. Por lo tanto, la etapa de excitación puede comprender que el dispositivo 100 de radiación acústica, especialmente el dispositivo 110 de generación de radiación, proporcione radiación 111 de excitación acústica a la planta 10 vascular, especialmente al tejido 20 vascular. La radiación 111 de excitación acústica puede comprender radiación que tiene una frecuencia que coincide con una frecuencia de resonancia del tejido 20 vascular, especialmente de un tejido xilemático. En particular,

la radiación 111 de excitación acústica puede comprender radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1-250 kHz.

5 En la etapa de detección, el dispositivo 120 de detección de radiación puede estar configurado para detectar radiación 121 de emisión acústica (de resonancia) desde la planta vascular, especialmente desde el tejido 20 vascular, y para proporcionar una señal relacionada con la emisión al sistema 300 de control. Por lo tanto, la etapa de detección puede comprender que el dispositivo 100 de radiación acústica, especialmente el dispositivo 120 de detección de radiación, detecte la radiación 121 de emisión acústica (de resonancia) desde la planta 10 vascular y proporcione una señal relacionada con la emisión al sistema 300 de control.

10 En la etapa de análisis, el sistema de control puede estar configurado para determinar el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos. Por lo tanto, la etapa de análisis puede comprender que el sistema 300 de control determine el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos.

15 En la realización representada, el dispositivo 100 de radiación acústica está acoplado físicamente al sistema 300 de control. En realizaciones adicionales, el dispositivo 100 de radiación acústica puede comprender un transmisor, en el que el transmisor está configurado para proporcionar (de manera inalámbrica) la señal relacionada con la emisión al sistema 300 de control.

20 En realizaciones, el sistema 1000 puede comprender un elemento 1100 de fijación a tallo configurado para fijar el dispositivo 100 de radiación acústica, especialmente el dispositivo 110 de generación de radiación, o especialmente el dispositivo 120 de detección de radiación, a un tallo 11 de planta de la planta 10 vascular. En dichas realizaciones, el modo operativo puede comprender proporcionar radiación 111 de excitación acústica al tallo 11 de la planta y detectar radiación de emisión acústica desde el tallo 11 de la planta. En la realización representada, el sistema 1000 comprende un elemento 1100 de fijación a tallo configurado para fijar el dispositivo 110 de generación de radiación al tallo 11 de la planta.

25 El tejido 20 vascular, especialmente el tejido xilemático, puede tener un eje A longitudinal, que puede ser paralelo, por ejemplo, a un eje longitudinal del tallo 11 de la planta (o de la rama 12 de la planta). En realizaciones, el dispositivo 100 de radiación acústica puede comprender un dispositivo 120, 120a de detección de radiación axial y/o un dispositivo 120, 120b de detección de radiación radial, especialmente un dispositivo 120, 120a de detección de radiación axial, o especialmente un dispositivo 120, 120b de detección de radiación radial. En dichas realizaciones, en el modo operativo:  
30 el dispositivo 120, 120a de detección de radiación axial puede estar dispuesto en una primera ubicación dispuesta axialmente a lo largo del eje A longitudinal; y/o el dispositivo 120, 120b de detección de radiación radial puede estar dispuesto en una segunda ubicación dispuesta perpendicular al eje A longitudinal.

35 En realizaciones, el sistema 1000 puede comprender además un sitio 1010 de medición configurado para alojar la planta 10 vascular, en el que: el dispositivo 100 de radiación acústica comprende un dispositivo 120, 120a de detección de radiación axial dispuesto en una primera ubicación (en el sitio 1010 de medición) dispuesta axialmente a lo largo del eje A longitudinal (de la planta 10 vascular huésped); y/o el dispositivo 100 de radiación acústica comprende un dispositivo 120, 120b de detección de radiación radial dispuesto en una segunda ubicación dispuesta perpendicular al eje A longitudinal (de la planta 10 vascular huésped).

40 La Fig. 2 representa esquemáticamente un tejido 20 vascular, especialmente un tejido xilemático, y una representación 25 de modelo de viga resonante del mismo. El tejido 20 vascular puede comprender múltiples elementos 21 de tejido vascular, especialmente elementos de vaso de xilema, separados por placas 22 de perforación. Por lo tanto, un elemento de vaso de xilema puede estar definido por (la presencia de) placas 22 de perforación en cada extremo. Los elementos de vaso del xilema pueden definir la unidad resonante para los ultrasonidos. El tejido 20 vascular, especialmente el elemento 21 de tejido vascular puede tener un radio R. Además, el elemento 21 de tejido vascular,  
45 especialmente el elemento de vaso de xilema, puede tener una longitud L, especialmente una longitud L de vaso de xilema. El tejido 20 vascular puede comprender además una pared 23 de tejido vascular, en el que la pared 23 de tejido vascular puede tener un espesor h de pared, especialmente un espesor h de pared de xilema.

50 En realizaciones, la etapa de análisis puede comprender ajustar al menos parte de la señal relacionada con la emisión a un modelo de modos de flexión de una viga cilíndrica, y determinar el parámetro físico de los vasos (al menos parcialmente) en base al modelo. Las líneas discontinuas en la Fig. 2 representan esquemáticamente la forma instantánea de una viga en vibración.

#### Experimentos

55 Se realizaron experimentos basados en la radiación de ultrasonidos emitida naturalmente por las plantas. En particular, durante una escasez de agua en las raíces y/o una fuerte transpiración, una columna de agua en el xilema puede estar sometida a una gran tensión de tracción. Más allá de una tensión crítica, el agua puede existir en un estado

metaestable durante un corto periodo de tiempo, lo que puede conducir a una cavitación local. El estrés puede liberarse mediante nucleación de burbujas de gas. Aparte de la cavitación, la formación de burbujas en el interior del xilema puede ocurrir mediante "siembra de aire", debido a una diferencia de presión a través del menisco aire-agua en los poros de las paredes celulares del xilema. El proceso de formación de burbujas puede resultar en una liberación de la energía elástica almacenada en la columna de agua, una parte de la cual puede convertirse en radiación de emisión acústica. En particular, pueden observarse frecuencias máximas en una multitud de pulsos de (ultra)sonido en el intervalo de 1-250 kHz, especialmente en el intervalo de 10-150 kHz, que pueden ser mucho más bajas que las frecuencias de burbuja resonantes teóricas. Por lo tanto, se realizaron experimentos para determinar si esta radiación de emisión acústica es indicativa o no de los parámetros físicos de los vasos, especialmente un parámetro físico de los vasos de un tejido xilemático. El parámetro físico de los vasos se determinó también usando métodos de la técnica anterior como ejemplos comparativos.

Por lo tanto, una planta 10 vascular puede emitir (espontáneamente) radiación 121 de emisión acústica, especialmente desde el tejido 20 vascular, lo que puede ser indicativo de un parámetro físico de los vasos. Sin embargo, en realizaciones, el método puede comprender especialmente proporcionar radiación 111 de excitación acústica a la planta 10 vascular, que, a continuación, puede proporcionar posteriormente la radiación 121 de emisión acústica.

#### Métodos

Recogida de muestras. Se obtuvieron tres réplicas biológicas en macetas de *Hydrangea quercifolia* L. desde el centro de jardinería "Intratuin" (al aire libre) en Elst, Países Bajos (51.913o N, 5.87o E) el 19 de Noviembre de 2019 a las 09:30 horas, y se trasladaron a un entorno de laboratorio interior a las 10:30 horas el mismo día en la Wageningen University and Research. Se cortaron tres muestras de brotes con hojas etiquetadas A, B y C, una de cada planta en maceta, manteniendo las hojas intactas y se mantuvieron inmediatamente en agua del grifo para prevenir embolias en los vasos del xilema en el extremo cortado. De cada muestra, se cortó un segmento de tallo recortado (sin pecíolos foliares) de 60-70 mm de largo en el interior del agua para reducir, especialmente prevenir, la entrada y el bloqueo de aire. Los segmentos eran aproximadamente cilíndricos con un diámetro de sección transversal de ~5-6 mm.

Registro de la emisión de ultrasonidos. Las muestras de brotes A, B y C con hojas se extrajeron del agua, el exceso de agua se limpió de la superficie del tallo con papel tisú y se dejó en el banco para su secado al aire, lo que resultó en un estrés por sequía acelerado. Se colocó un micrófono de ultrasonidos M500-USB (con una ventana de sensibilidad fiable entre 10 kHz y 150 kHz) de Pettersson primero en la dirección axial (~2 mm desde la cara de corte del vástago normal a la sección transversal) y, a continuación, en la dirección radial (en la superficie cilíndrica del vástago) para registrar la radiación de emisión acústica a una velocidad de muestreo de 500 kHz en ventanas de tiempo continuas de 120 segundos. Los espectros de frecuencia de las señales medidas se obtuvieron mediante una transformada de Fourier discreta de 250 puntos, que abarca un marco de tiempo de 1,5 ms.

Ejemplo comparativo - técnica de infusión de pintura de látex según se describe en Chatelet et al., "Xylem Structure and Connectivity in Grapevine (*Vitis vinifera*) Shoots Provides a Passive Mechanism for the Spread of Bacteria in Grape Plants", *Annals of Botany*, 2006, que se incorpora al presente documento mediante esta referencia. Los segmentos de tallo se montaron verticalmente sobre un recipiente de vidrio lleno de solución de pintura de látex desgasificada, con un extremo sumergido en la pintura y el otro extremo insertado firmemente en un tubo de plástico conectado a una bomba de succión que aplica una diferencia de presión de 400 mbar. La aplicó cinta adhesiva a la unión vástago-tubo y se untó con vaselina para evitar fugas de aire. A medida que la bomba aspiraba la solución a través del vástago durante 12 horas, la pintura llenaba y permanecía confinada en un vaso de xilema, mientras se conducía agua clara a través de todo el vástago (a través de las fosas limítrofes entre los vasos de xilema adyacentes) y emergía en el tubo. Posteriormente, las muestras de tallo se cortaron con una cuchilla a intervalos de 5 mm. A continuación, se contó el número de vasos pintados en cada cara de las rebanadas cortadas a partir de imágenes capturadas por un microscopio digital VHX de Keyence.

Ejemplo comparativo - Crio-microscopía electrónica de barrido (crio-SEM) de una pared y elementos de vaso del xilema. Las secciones transversales y longitudinales de los segmentos de tallo de hortensia elegidos aleatoriamente se realizaron usando una cuchilla de afeitar. Las secciones transversales se dejaron en un papel de filtro durante 1-2 minutos para eliminar la mayor parte del agua adherida. Después, las secciones se fijaron a un porta-muestras usando Tissue-Tek. Las muestras se congelaron sumergiendo el porta-muestras en nitrógeno líquido. Posteriormente, las muestras se transfirieron a una cámara de crio-preparación (Leica) bajo vacío, donde se mantuvieron a -90°C durante 3 minutos para eliminar el hielo desde la superficie (grabado por congelación para eliminar la contaminación por vapor de agua). Todavía bajo vacío, las muestras se revistieron con 12 nm de tungsteno y se transfirieron usando un elemento de transferencia VCT100 (Leica) a un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (Magellan 400 de FEI). Las muestras se analizaron a 2 kV, 13 pA a -120°C. Se observó que el espesor físico de las paredes celulares del xilema era de ~1 µm. Se observó que la longitud de los elementos de vaso individuales del xilema estaba comprendida entre 0,6 mm y 1 mm.

Ejemplo comparativo - carga de tracción uniaxial para la determinación del módulo elástico. Se cortaron múltiples

segmentos de vástago de longitudes comprendidas en el intervalo de 4-7 cm y se montaron verticalmente entre dos abrazaderas de una máquina de ensayo de tracción Zwick/Roell Z005. La longitud pre-deformada inicial es igual a la separación vertical entre las abrazaderas y se mantuvo en 20 mm. La tensión uniaxial se calcula como la fuerza de tracción aplicada por el equipo dividida por el área de sección transversal promedio del segmento de vástago, y la deformación longitudinal se calcula como el cambio en la longitud del vástago por unidad de longitud inicial. El módulo E de Young se calcula entonces como la pendiente de la parte lineal de la curva de tensión-deformación a pequeños valores de deformación (aproximadamente  $10^{-4}$ ). Se calculó también la densidad de masa promedio de cada muestra a partir del peso y del volumen medidos justo antes del procedimiento de carga de tracción. Los pesos se midieron con una balanza de precisión Scaltec SBC 33, mientras que las dimensiones se midieron con un Calibre Vernier con una resolución de 0,1 mm.

Mediciones

Mediciones de ultrasonidos. Las muestras de tallos recién cortadas e hidratadas se colocaron en un banco para inducir estrés por sequía acelerada a temperatura ambiente durante el día. Los pulsos de ultrasonidos se midieron con un micrófono de ultrasonidos de banda ancha colocado en una primera ubicación dispuesta axialmente con respecto a un eje A longitudinal del tallo 11 de la planta, y en una segunda ubicación dispuesta perpendicular con respecto al eje A longitudinal del tallo 11 de la planta. La Fig. 3A representa las emisiones de ultrasonidos registradas en la primera ubicación y que comienzan después de 5 minutos en el proceso de secado con una amplitud A (en u.a.) frente al tiempo T (en segundos).

La Fig. 3B y la Fig. 3D representan esquemáticamente formas de onda representativas en el dominio del tiempo de pulsos individuales para la muestra C con una amplitud de pulso A (en u.a.) a lo largo del tiempo T (en segundos) en la primera ubicación (Fig. 3B) y en la segunda ubicación (Fig. 3D). Las Figs. 3C y 3E representan esquemáticamente los espectros en el dominio de la frecuencia correspondientes con una amplitud de pulso A (en dB) frente a la frecuencia f (en kHz) (obtenidos mediante una transformación de Fourier del pulso en el dominio del tiempo), en el que la línea de 0 dB se refiere a una amplitud de 1 en el dominio del tiempo.

La Fig. 3B representa las observaciones obtenidas en la primera ubicación. Específicamente, la Fig. 3B representa la línea L<sub>1</sub> que representa un pulso que comienza en T= 33,7263 s, y una envolvente F<sub>1</sub> de ajuste correspondiente. La envolvente de la amplitud del pulso en el dominio del tiempo decae exponencialmente con una constante de tiempo 1/e τ<sub>s</sub>, en el que τ<sub>s</sub> se refiere específicamente a un tiempo de asentamiento de la radiación de emisión acústica. El tiempo τ<sub>s</sub> de asentamiento (radiación de emisión acústica) del pulso puede obtenerse ajustando una función exponencial a la envolvente de ajuste según la fórmula

$$A(t) = A_0 * e^{-T/\tau_s}$$

en la que A<sub>0</sub> es la amplitud en el pico del pulso (en el presente documento a aproximadamente T=0,3s).

La Fig. 3C representa esquemáticamente los espectros de frecuencia correspondientes a pulsos ejemplares medidos en la primera ubicación. Específicamente, la línea L<sub>2</sub> corresponde a un pulso que comienza en T= 19,5648 s y la línea L<sub>3</sub> corresponde a un pulso que comienza en T= 33,7263 s. Las flechas indican los picos (anchos) que se usaron para determinar los parámetros físicos de los vasos (véase a continuación).

La Fig. 3D representa las observaciones obtenidas en la segunda ubicación. Específicamente, la Fig. 3D representa la línea L<sub>4</sub> que representa un pulso que comienza en T= 72,5614 s, y una envolvente F<sub>2</sub> de ajuste correspondiente.

La Fig. 3E representa esquemáticamente los espectros de frecuencia correspondientes a pulsos ejemplares medidos en la segunda ubicación. Específicamente, la línea L<sub>5</sub> corresponde a un pulso que comienza en T= 48,4442 s y la línea L<sub>6</sub> corresponde a un pulso que comienza en T= 99,1434 s. Las flechas indican los picos (anchos) que se usaron para determinar los parámetros físicos de los vasos (véase a continuación).

En base a las mediciones experimentales, el τ<sub>s</sub> más probable = 19,1 μs, 20,9 μs y 20 μs, para las muestras A, B y C, respectivamente, para los pulsos en la dirección axial (medidos en la primera ubicación). Los valores τ<sub>s</sub> correspondientes para la dirección radial (medidos en la segunda ubicación) fueron de 33,8 μs, 14,1 μs y 21 μs.

Se encontró que la frecuencia f<sub>p</sub> de pico más probable (axial) con la mayor amplitud en los pulsos de sonido registrados axialmente desde las muestras A, B y C era de 36,5±4 kHz, 32,7±5 kHz y 42,3±8,5 kHz, respectivamente. Además, se observan picos cercanos a múltiplos enteros de f<sub>p</sub> (axial), tal como se muestra en la Fig. 3C. Las frecuencias observadas y calculadas para la primera ubicación se resumen en la Tabla 1 a continuación:

Modo	Muestra A		Muestra B		Muestra C	
m	Observada [kHz]	Calculada [kHz]	Observada [kHz]	Calculada [kHz]	Observada [kHz]	Calculada [kHz]
1	30-40	35	32-38	36	40-50	46
2	60-70	70	68-72	72	90-110	92
3	100-120	105	96-115	108	140-150	138
4	135-140	140	128-145	144	Por debajo del nivel de ruido	----

En la Tabla 1, los valores observados se refieren a mediciones experimentales, mientras que los valores calculados se obtienen suponiendo que la frecuencia observada en el intervalo de 30-50 kHz corresponde a  $m=1$ , es decir, suponiendo que las frecuencias observadas más pequeñas corresponden a un orden de modo de 1.

- 5 Por lo tanto, debido a que los valores observados se encuentran cerca de los valores calculados, las frecuencias de resonancia pueden determinarse de manera precisa a partir de la radiación de emisión acústica medida en la primera ubicación.

10 Se observó un comportamiento similar en los espectros de frecuencia de los pulsos de ultrasonido registrados radialmente (véase la Fig. 3E), con la frecuencia de pico característica más baja comprendida en el intervalo de 15 -20 kHz presente en las tres muestras. Además, las frecuencias características correspondientes a resonancias de orden superior se observaron principalmente en los siguientes intervalos: 30-40 kHz, 55-70 kHz, 84-92 kHz y 110-140 kHz. Las frecuencias observadas y calculadas para la segunda ubicación se resumen en la Tabla 2 a continuación:

Modo		Muestra A		Muestra B		Muestra C	
n	$k_T$	Observada [kHz]	Calculada [kHz]	Observada [kHz]	Calculada [kHz]	Observada [kHz]	Calculada [kHz]
1	4,73	-	5,4-7,25	-	8	-	5,4-6,5
2	7,8532	15-20	15-20	18-24	22	15-18	15-18
3	10,996	30-40	29,4-39,2	32-46	43,1	30-35	29,4-35,2
4	14,137	55-70	48,6-64,8	63-75	71,24	48-52	48,7-58,3
5	17,137	84-92	72,6-96,8	90-110	106,4	90-100	72,8-87,2
6	20,42	110-120	101,4-135,2	126-142	148,63	110-135	101,6-121,8

- 15 En la Tabla 2, los valores observados se refieren a mediciones experimentales, mientras que los valores calculados se obtienen suponiendo que la frecuencia observada en el intervalo de 15-24 kHz corresponde a  $n=2$ , es decir, suponiendo que las frecuencias observadas más pequeñas corresponden a un orden de modo de 2.

Por lo tanto, de manera similar a las mediciones en la primera ubicación, las frecuencias de resonancia pueden determinarse también de manera precisa a partir de la radiación de emisión acústica medida en la segunda ubicación.

- 20 La radiación de emisión acústica observada en la primera ubicación se interpretó modelando el vaso de xilema como una tubería cilíndrica de longitud  $L$  efectiva que mantiene ondas estacionarias longitudinales en el agua cuyas frecuencias de resonancia dependen del orden  $m$  de modo, y la velocidad longitudinal del sonido en la tubería  $v_{\text{efi}}$ . Estas ondas sonoras (que se espera que sean dominantes en los ultrasonidos registrados axialmente) experimentarán una amortiguación principalmente debido a la viscosidad  $\eta_1$  dinámica en el xilema. Las oscilaciones amortiguadas pueden describirse mediante un resonador lineal de 2º orden donde la relación  $\zeta$  de amortiguación es una función de la

inductancia, la resistencia y la capacitancia acústicas del sistema. A partir del  $f_p$  (axial) y  $\tau_s$  observados,  $\zeta$  se obtiene como

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_{p(axial)} \tau_s)^2}}$$

y el radio R acústico efectivo del xilema se obtiene como:

5 
$$R = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot \tau_s}{\rho}}$$

en la que  $\rho$  es la densidad de masa de la savia (agua). Cabe señalar que, en este modelo, R puede calcularse independientemente de la longitud L, a partir del tiempo de asentamiento de la señal acústica medida en el dominio del tiempo.

La frecuencia  $f_L$  de resonancia puede calcularse a partir del  $f_p$  (axial) y  $\zeta$ , usando:

10 
$$f_p = f_L \sqrt{1 - \zeta^2}$$

La longitud L efectiva del xilema, especialmente la longitud L de un elemento 21 de vaso del xilema puede expresarse como:

$$\frac{1}{L^2} = \frac{4f_L^2}{m^2 v_s^2} = \frac{4f_L^2}{m^2} \left[ \frac{1}{v_L^2} + \frac{2\rho R}{h} \cdot \left( \frac{1}{E} \right) \right]$$

15 en la que  $v_L$  es la velocidad del sonido en el agua ( $\approx 1485$  m/s a 20°C), E es el módulo elástico de la pared del xilema y h es el espesor efectivo de la pared (un parámetro de ajuste).

20 Por lo tanto, en realizaciones, el método, especialmente la etapa de análisis, puede comprender ajustar una curva de decaimiento exponencial a al menos parte de la señal relacionada con la emisión (en el dominio del tiempo) y determinar un parámetro de decaimiento, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base al parámetro de decaimiento, especialmente en el que el parámetro físico de los vasos comprende uno o más de entre un radio R de los vasos del xilema, una viscosidad de la savia y una viscoelasticidad del xilema.

En realizaciones adicionales, el método, especialmente la etapa de análisis, puede comprender determinar uno o más picos en al menos parte de la señal relacionada con la emisión en el dominio de la frecuencia, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base a los uno o más picos, y en el que el parámetro físico de los vasos comprende uno o más de entre una longitud L del elemento de vaso del xilema y un módulo E de Young.

25 En realizaciones, el método, especialmente la etapa de análisis, puede comprender ajustar al menos parte de la señal relacionada con la emisión a un modelo de modos de flexión de una viga cilíndrica, y determinar el parámetro físico de los vasos en base al modelo. En particular, la radiación de emisión acústica observada en la segunda ubicación se analizó con un modelo de modos de flexión de una viga cilíndrica rodeado por un material viscoelástico. Se obtuvo una buena coincidencia para el conjunto de frecuencias si el modo de segundo orden se asignaba al intervalo de  
30 frecuencias de 15-20 kHz para todas las muestras. Esencialmente, los vasos del xilema se modelan como una viga cilíndrica viscoelástica: un compuesto de pared celular - agua con una densidad  $\rho_{xilema}$  de masa efectiva. Se usaron segmentos de tallo recién cortados, recogidos de la misma planta 10 y similares a los usados para el registro de sonido y la infusión de pintura, para medir una densidad de masa media de  $\approx 1300 \pm 300$  kg.m<sup>-3</sup> que, a su vez, proporciona una estimación cercana de la  $\rho_{xilema}$ . Usando el modelo de viga, esto puede resultar en:

35 
$$\frac{1}{L^2} = \frac{(4\pi f_T \sqrt{\rho_{xilema}})}{k_T^2 R}, \left( \frac{1}{\sqrt{E}} \right)$$

en la que  $f_T$  es la frecuencia de resonancia de las vibraciones transversales y  $k_T$  es la constante de modo. En combinación con las ecuaciones anteriores, esto proporciona:

$$E = \left[ \frac{4\rho_x R^2 k_T^2 f_T^2 v_L}{(m^2 \pi h f_T^2 \rho_{xilema}^2 v_L) + \sqrt{m^2 \pi^2 h^2 f_T^2 \rho_{xilema}^2 v_L^2 - 8h \rho_x R^2 k_T^2 f_T^2}} \right]^2$$

La amortiguación en el dominio del tiempo en los ultrasonidos registrados radialmente puede estar dominada por la

viscosidad ( $\eta_{sólida}$ ) en la materia sólida que comprende la pared celular, las fibras del xilema, el cambium y otros tejidos vasculares. Dicho sistema puede modelarse como un material de Maxwell lineal y la  $\eta_{sólida}$  puede obtenerse a partir del tiempo  $\tau_s$  de sedimentación  $1/e$  de la amplitud del pulso como:

$$\tau_s = \frac{\eta_{sólida}}{k}$$

- 5 Se determinaron varios parámetros físicos de los vasos usando el método de la invención (usando las ecuaciones indicadas anteriormente) así como usando métodos comparativos (destructivos). Los valores determinados se resumen en la Tabla 3 a continuación:

Parámetro	Basado en radiación de emisión acústica	Método comparativo	
R [μm]	9,89 ± 1,6	9 - 18	Microscopía óptica; microscopía electrónica de barrido
Longitud L del elemento de vaso del xilema	1,08 ± 0,18	6,38 - 8,45	Microscopía electrónica de barrido
E [GPa]	0,4 ± 0,1	0,6 - 1,0	Carga de tracción uniaxial
$\eta_{sólida}$ [kPa.s]	10,8 ± 2,3	-	-
h [μm]	0,8	1,0	Microscopía electrónica de barrido

- 10 Por lo tanto, los parámetros pueden determinarse de manera precisa usando observaciones no destructivas de radiación de emisión acústica.

En particular, los experimentos pueden demostrar el uso de radiación de emisión acústica desde una planta vascular emitida por la planta vascular para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido vascular en la planta vascular.

- 15 El término "múltiples" se refiere a dos o más. Además, los términos "múltiples" y "un número de" pueden usarse indistintamente.

- 20 Las personas expertas en la técnica entenderán el significado de los términos "sustancialmente" o "esencialmente" en el presente documento, y de términos similares. Los términos "sustancialmente" o "esencialmente" pueden incluir también realizaciones con "enteramente", "completamente", "la totalidad", etc. Por lo tanto, en las realizaciones, el adverbio sustancialmente o esencialmente también puede eliminarse. Cuando sea aplicable, el término "sustancialmente" o el término "esencialmente" puede hacer referencia también al 90% o más, tal como al 95% o más, especialmente al 99% o más, incluso más especialmente al 99,5% o más, incluyendo el 100%. Además, los términos "alrededor de" y "aproximadamente" pueden hacer referencia también al 90% o más, tal como al 95% o más, especialmente al 99% o más, incluso más especialmente al 99,5% o más, incluyendo el 100%. Para valores numéricos, debe entenderse que los términos "sustancialmente", "esencialmente", "alrededor de" y "aproximadamente" pueden hacer referencia también al intervalo de 90% - 110%, tal como 95%-105%, especialmente 99%-101% de los valores a los que se refiere.

El término "comprende" incluye también realizaciones en las que el término "comprende" significa "consiste en".

El término "y/o" se refiere especialmente a uno o más de los elementos indicados antes y después de "y/o". Por ejemplo, una frase "elemento 1 y/o elemento 2" y frases similares pueden referirse a uno o más del elemento 1 y del

elemento 2. En una realización, la expresión "que comprende" puede referirse a "que consiste en", pero en otra realización puede referirse también a "que contiene al menos las especies definidas y opcionalmente una o más especies diferentes".

5 Además, los términos primero, segundo, tercero y similares en la descripción y en las reivindicaciones se usan para distinguir entre elementos similares y no necesariamente para describir un orden secuencial o cronológico. Debe entenderse que los términos usados de esta manera son intercambiables bajo circunstancias apropiadas y que las realizaciones de la invención descritas en el presente documento pueden funcionar en otras secuencias distintas a las descritas o ilustradas en el presente documento.

10 Los dispositivos, aparatos o sistemas pueden describirse en el presente documento, entre otras cosas, durante el funcionamiento. Tal como será evidente para la persona experta en la técnica, la invención no está limitada a métodos operativos o dispositivos, aparatos o sistemas en funcionamiento.

La expresión "realización adicional" y términos similares pueden referirse a una realización que comprende las características de la realización descrita anteriormente, pero pueden referirse también a una realización alternativa.

15 Cabe señalar que las realizaciones indicadas anteriormente ilustran, en lugar de limitar, la invención, y que las personas expertas en la técnica serán capaces de diseñar muchas realizaciones alternativas sin apartarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

En las reivindicaciones, cualquier signo de referencia colocado entre paréntesis no se interpretará como limitativo de la reivindicación.

20 El uso del verbo "comprender" y sus conjugaciones no excluye la presencia de elementos o etapas distintos a los indicados en una reivindicación. A menos que el contexto requiera claramente lo contrario, a lo largo de la descripción y las reivindicaciones, las palabras "comprende", "que comprende", "incluye", "que incluye", "contiene", "que contiene" y similares deben interpretarse en un sentido inclusivo, en contraposición a un sentido exclusivo o exhaustivo; es decir, en el sentido de "que incluye, pero no está limitado a".

El artículo "un" o "una" que precede a un elemento no excluye la presencia de una pluralidad de dichos elementos.

25 La invención puede implementarse mediante un hardware que comprenda varios elementos distintos, y mediante un ordenador programado de manera adecuada. En una reivindicación de un dispositivo, o de un aparato, o de un sistema, que enumera varios medios, varios de estos medios pueden estar materializados en un mismo elemento de hardware. El mero hecho de que determinadas medidas se mencionen en reivindicaciones dependientes mutuamente diferentes no indica que no pueda usarse de manera ventajosa una combinación de esas medidas.

30 La invención se aplica además a un dispositivo, aparato o sistema que comprende uno o más de los rasgos caracterizantes descritos en la descripción y/o mostrados en los dibujos adjuntos. La invención se refiere además a un método o proceso que comprende uno o más de los rasgos caracterizantes descritos en la descripción y/o mostrados en los dibujos adjuntos. Además, si un método o una realización del método se describe como ejecutado en un dispositivo, aparato o sistema, se entenderá que el dispositivo, aparato o sistema es adecuado o está configurado para  
35 (ejecutar) el método o la realización del método respectivamente.

Los diversos aspectos descritos en la presente patente pueden combinarse para proporcionar ventajas adicionales. Además, la persona experta en la técnica entenderá que pueden combinarse realizaciones y que también pueden combinarse más de dos realizaciones. Además, algunas de las características pueden formar la base para una o más solicitudes divisionales.

40

**REIVINDICACIONES**

1. Método para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido (20) vascular en una planta (10) vascular, en el que el método comprende:
- 5 - una etapa de detección que comprende detectar radiación (121) de emisión acústica desde la planta (10) vascular y proporcionar una señal relacionada con la emisión; y
  - 10 - una etapa de análisis que comprende determinar el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos, y en el que la etapa de análisis comprende ajustar al menos parte de la señal relacionada con la emisión a un modelo de modos de flexión de una viga cilíndrica y determinar el parámetro físico de los vasos en base al modelo.
2. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el método comprende:
- 15 - una etapa de excitación que comprende proporcionar radiación (111) de excitación acústica a la planta (10) vascular, en el que la radiación (111) de excitación acústica comprende radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1-250 kHz, y opcionalmente en el que la radiación (111) de excitación acústica comprende radiación de banda ancha que tiene una o más frecuencias en el intervalo de 10 - 150 kHz.
3. Método según la reivindicación 2, en el que la etapa de excitación comprende proporcionar la radiación (111) de excitación acústica mediante un pulso, en el que se cumple uno o más de entre:
- 20 - el pulso tiene una duración de pulso mayor que un tiempo de asentamiento característico debido a la amortiguación del tejido (20) vascular; y
  - el pulso tiene una duración de pulso menor que el tiempo de vuelo de la radiación de excitación acústica a través del tejido (20) vascular.
4. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 2-3 anteriores, en el que se cumple uno o más de entre:
- 25 - la etapa de excitación comprende un barrido de frecuencia de excitación desde una primera frecuencia hasta una segunda frecuencia; y
  - la etapa de detección comprende un barrido de frecuencia de emisión desde la primera frecuencia hasta la segunda frecuencia;
- en el que la primera frecuencia y la segunda frecuencia se seleccionan de entre el intervalo de 1-250 kHz.
5. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el tejido (20) vascular tiene un eje (A) longitudinal, y en el que la etapa de detección comprende detectar:
- 30 - radiación (121) de emisión acústica desde la planta (10) vascular en una primera ubicación dispuesta axialmente con respecto al eje (A) longitudinal; y/o
  - radiación (121) de emisión acústica desde la planta (10) vascular en una segunda ubicación dispuesta perpendicularmente con respecto al eje (A) longitudinal.
6. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de análisis comprende uno o más de los siguientes:
- 35 - ajustar una curva de decaimiento exponencial a al menos parte de la señal relacionada con la emisión y determinar un parámetro de decaimiento, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base al parámetro de decaimiento, en el que el parámetro físico de los vasos comprende uno o más de entre un radio de los vasos del xilema, una viscosidad de la savia y una viscoelasticidad del xilema; y
  - 40 - determinar uno o más picos en al menos parte de la señal relacionada con la emisión en el dominio de la frecuencia, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base a los uno o más picos, y en el que el parámetro físico de los vasos comprende uno o más de entre una longitud del elemento de vaso de xilema y un módulo de Young.
7. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el método comprende además uno o más de los siguientes:
- 45 - controlar una condición de cultivo de planta en base al parámetro físico de los vasos, en el que la condición de cultivo de planta se selecciona de entre el grupo que comprende un régimen de riego, un régimen de

iluminación y un régimen de nutrientes; y

- determinar el parámetro físico de los vasos para múltiples plantas (10) vasculares, en el que el método comprende seleccionar una o más plantas (10) vasculares de entre las múltiples plantas (10) vasculares para su reproducción en base a los parámetros físicos de los vasos.

5 8. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se cumple uno o más de entre:

- la radiación (121) de emisión acústica es emitida naturalmente por la planta (10) vascular;

- la planta (10) vascular se encuentra en un estado de estrés;

- la planta (10) vascular se encuentra en un estado de estrés como resultado de la sequía, y

- el tejido (20) vascular es un tejido xilemático en un tallo (11) de planta o en una rama (12) de planta.

10 9. Sistema (1000) para determinar un parámetro físico de los vasos de un tejido (20) vascular en una planta (10) vascular, en el que el sistema (100) comprende un dispositivo (100) de radiación acústica y un sistema (300) de control, en el que el sistema (1000) tiene un modo operativo, en el que el modo operativo comprende:

15 - una etapa de detección que comprende que el dispositivo (100) de radiación acústica detecte la radiación (121) de emisión acústica desde la planta (10) vascular y proporcione una señal relacionada con la emisión al sistema (300) de control; y

20 - una etapa de análisis que comprende que el sistema (300) de control determine el parámetro físico de los vasos en base a la señal relacionada con la emisión, en el que el parámetro físico de los vasos comprende una elasticidad o una dimensión de los vasos, y que el sistema (300) de control ajuste al menos parte de la señal relacionada con la emisión a un modelo de modos de flexión de una viga cilíndrica, y determine el parámetro físico de los vasos en base al modelo.

10. Sistema (1000) según la reivindicación 9, en el que el modo operativo comprende además uno o más de entre los siguientes:

25 - una etapa de excitación que comprende que el dispositivo (100) de radiación acústica proporcione radiación (111) de excitación acústica a la planta (10) vascular, en el que la radiación de excitación acústica comprende radiación que tiene una frecuencia seleccionada de entre el intervalo de 1-250 kHz, opcionalmente en el que la radiación de excitación acústica comprende radiación de banda ancha que tiene una o más frecuencias en el intervalo de 10 - 150 kHz; y

30 - una etapa de ejecución, en el que la etapa de ejecución comprende que el sistema de control controle una condición de cultivo de plantas en base al parámetro físico de los vasos, en el que la condición de cultivo de plantas se selecciona de entre el grupo que comprende un régimen de riego, un régimen de iluminación y un régimen de nutrientes.

35 11. Sistema (1000) según la reivindicación 10, en el que el sistema (1000) comprende un elemento (1100) de fijación a tallo configurado para fijar el dispositivo (100) de radiación acústica a un tallo (11) de planta de la planta (10) vascular, en el que el modo operativo comprende proporcionar radiación (111) de excitación acústica al tallo (11) de la planta y detectar radiación (121) de emisión acústica desde el tallo (11) de la planta.

12. Sistema (1000) según una cualquiera de las reivindicaciones 10-11 anteriores, en el que la etapa de excitación comprende que el dispositivo (100) de radiación acústica proporcione la radiación (111) de excitación acústica mediante un pulso, en el que se cumple uno o más de entre:

40 - el pulso tiene una duración de pulso mayor que un tiempo de asentamiento característico del tejido (20) vascular; y

- el pulso tiene una duración de pulso menor que el tiempo de vuelo de la radiación de excitación acústica a través del tejido (20) vascular.

13. Sistema (1000) según una cualquiera de las reivindicaciones 10-12 anteriores, en el que:

45 - la etapa de excitación comprende que el dispositivo (100) de radiación acústica proporcione un barrido de frecuencia de excitación desde una primera frecuencia a una segunda frecuencia; y

- la etapa de detección comprende que el dispositivo (100) de radiación acústica proporcione un barrido de frecuencia de emisión desde la primera frecuencia a la segunda frecuencia; en el que la primera frecuencia y la segunda frecuencia se seleccionan de entre el intervalo de 1-250 kHz.

14. Sistema (1000) según la reivindicación 9-13, en el que el tejido (20) vascular tiene un eje (A) longitudinal, y en el que el sistema (1000) comprende además un sitio (1010) de medición configurado para alojar la planta (10) vascular, en el que:
- 5       - el dispositivo (100) de radiación acústica comprende un dispositivo (120a) de detección de radiación dispositivo de detección de radiación axial dispuesto en una primera ubicación dispuesta axialmente a lo largo del eje (A) longitudinal; y/o
- el dispositivo (100) de radiación acústica comprende un dispositivo (120b) de detección de radiación radial dispuesto en una segunda ubicación dispuesta perpendicular al eje (A) longitudinal.
15. Sistema (1000) según una cualquiera de las reivindicaciones 9-14 anteriores, en el que la etapa de análisis
- 10       comprende uno o más de entre:
- que el sistema (300) de control ajuste una curva de decaimiento exponencial a al menos parte de la señal relacionada con la emisión y determine un parámetro de decaimiento, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base al parámetro de decaimiento, en el que el parámetro físico de los vasos comprende uno o más de entre un radio de vaso de xilema, una viscosidad de la savia y una viscoelasticidad del xilema; y
- 15       - que el sistema (300) de control determine uno o más picos en al menos parte de la señal relacionada con la emisión en el dominio de la frecuencia, en el que el parámetro físico de los vasos se determina en base a los uno o más picos, y en el que el parámetro físico de los vasos comprende uno o más de entre la longitud de un elemento de vaso del xilema y un módulo de Young

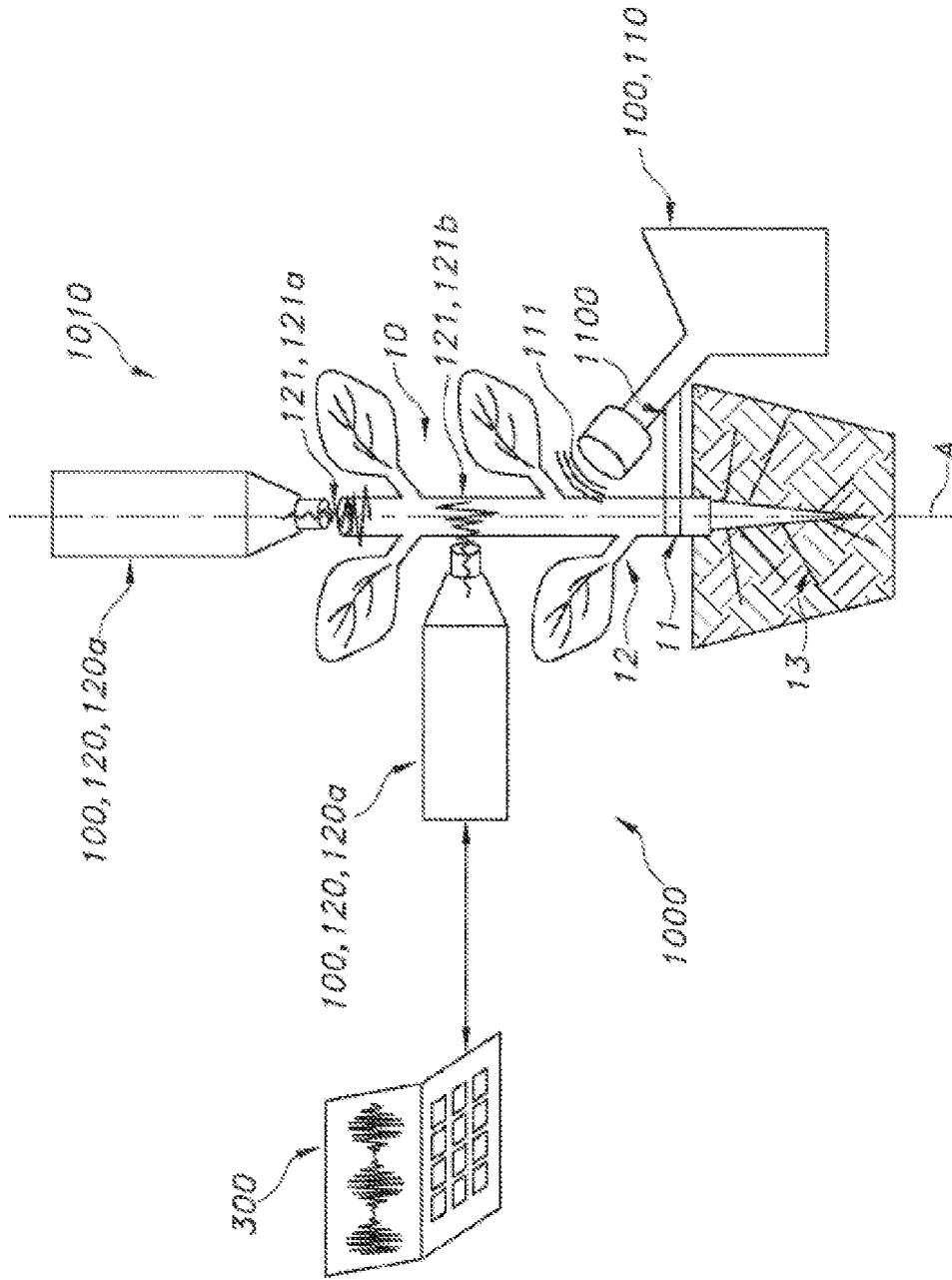


FIG. 1

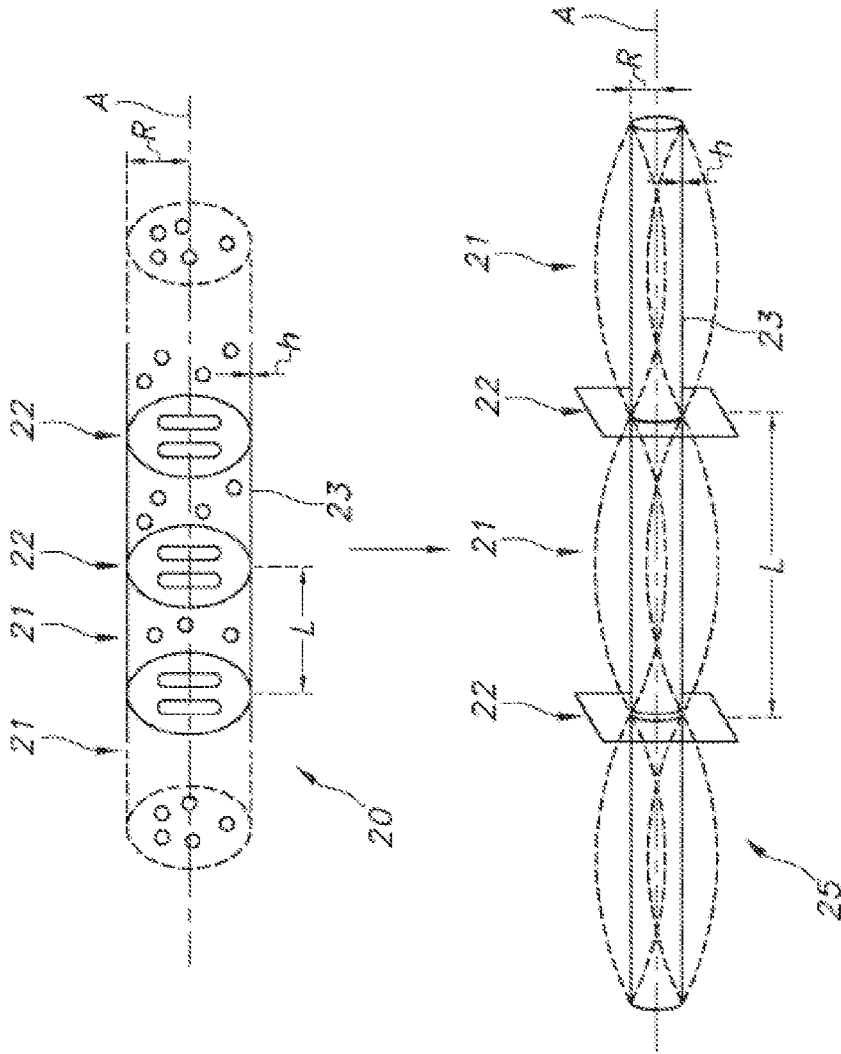


FIG. 2

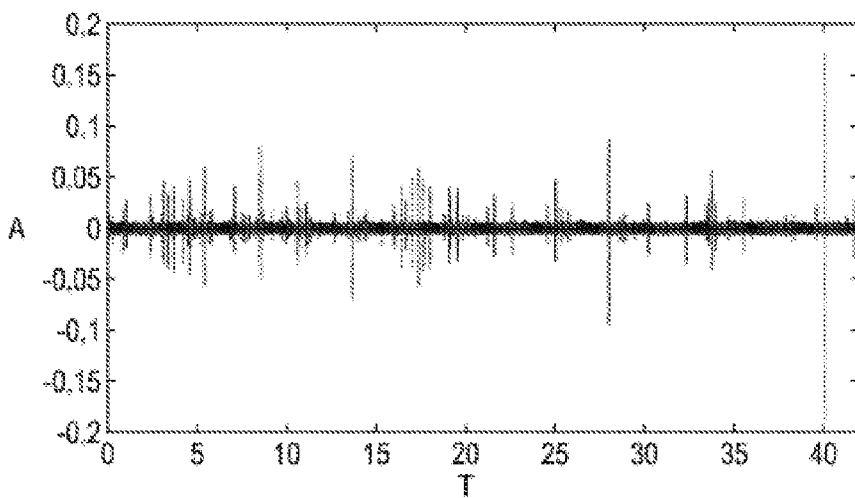


FIG. 3A

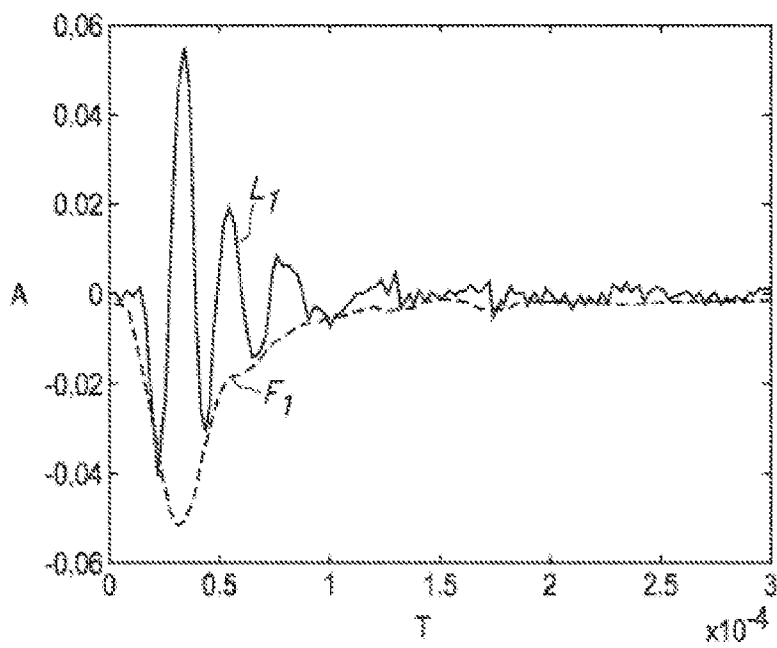


FIG. 3B

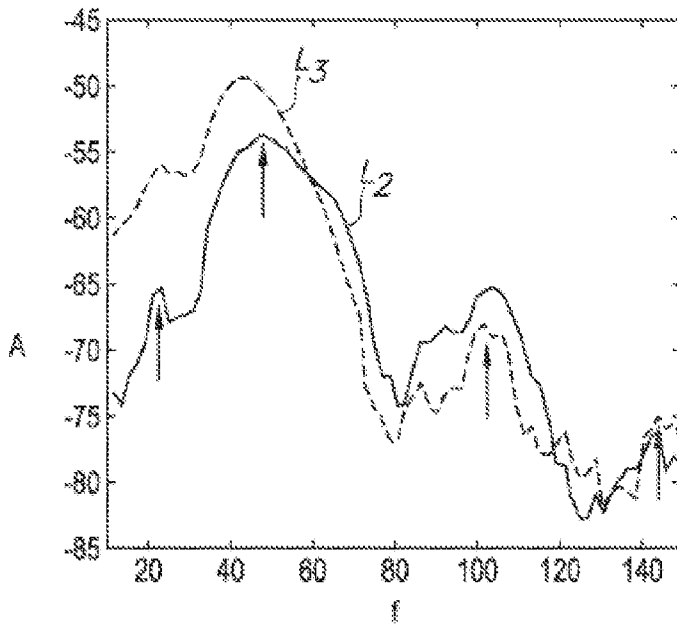


FIG. 3C

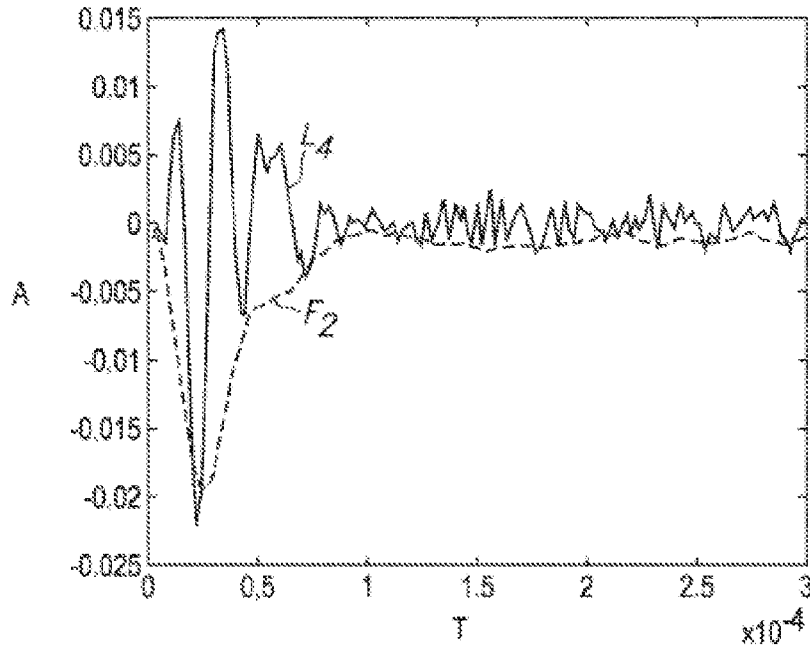


FIG. 3D

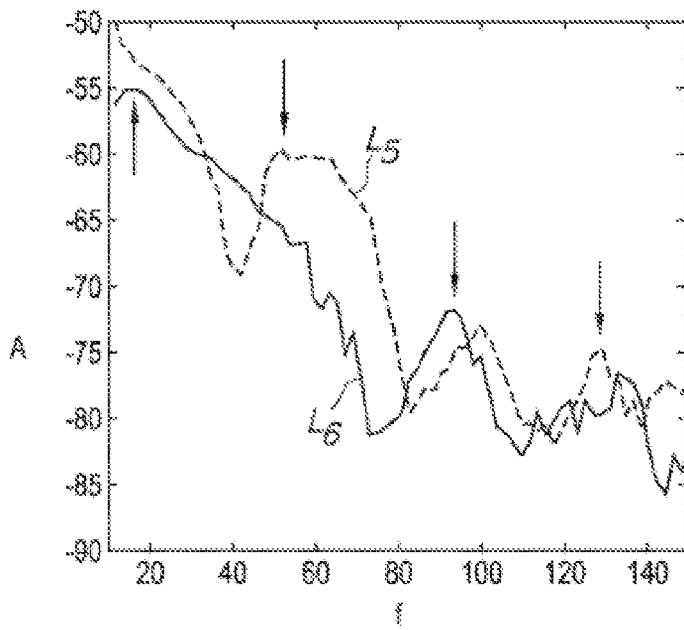


FIG. 3E