



(11) **EP 4 345 191 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**03.04.2024 Patentblatt 2024/14**

(21) Anmeldenummer: **22020474.7**

(22) Anmeldetag: **30.09.2022**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):  
**C25B 1/02** (2006.01) **C25B 1/04** (2021.01)  
**C25B 9/19** (2021.01) **C25B 9/73** (2021.01)  
**C25B 15/021** (2021.01)

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):  
**C25B 1/02; C25B 1/04; C25B 9/19; C25B 9/73;**  
**C25B 15/021**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB**  
**GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO**  
**PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA ME**  
Benannte Validierungsstaaten:  
**KH MA MD TN**

(71) Anmelder:  
• **Linde GmbH**  
**82049 Pullach (DE)**  
• **Technische Universität München**  
**80333 München (DE)**

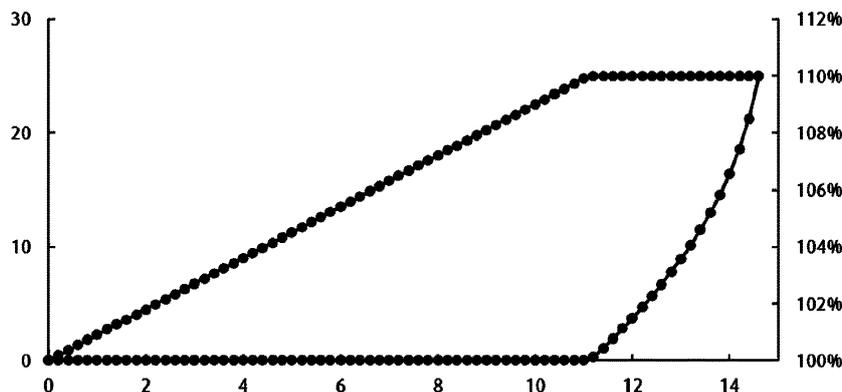
(72) Erfinder:  
• **Peschel, Andreas**  
**82049 Pullach (DE)**  
• **Klein, Harald**  
**80290 München (DE)**  
• **Hemauer, Johanna**  
**80290 München (DE)**  
• **Fahr, Steffen**  
**80290 München (DE)**

(74) Vertreter: **Fischer, Werner**  
**Linde GmbH**  
**Intellectual Property EMEA**  
**Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6-14**  
**82049 Pullach (DE)**

(54) **VERFAHREN UND ANLAGE ZUR HERSTELLUNG EINES WASSERSTOFF ENTHALTEND EN PRODUKTS UNTER EINSATZ EINER ELEKTROLYSE**

(57) Es wird ein Verfahren zur Herstellung eines Wasserstoff enthaltenden Produkts (111) unter Einsatz einer Elektrolyse (10) vorgeschlagen, wobei die Elektrolyse (10) unter Verwendung eines oder mehrerer, eine Vielzahl von Elektrolysezellen aufweisenden Elektrolysestapels durchgeführt wird, wobei die Elektrolysezellen während eines kontinuierlichen oder eines diskontinuierlichen Produktionszeitraums zwischen einem ersten Zeitpunkt (BoL) und einem zweiten Zeitpunkt (EoL) mit einer an den Elektrolysestapel angelegten Elektrolyse-

spannung beaufschlagt werden, und wobei die Elektrolysezellen während des Produktionszeitraums mit einer auf einen Vorgabewert eingestellten Betriebstemperatur betrieben werden. Hierbei ist vorgesehen, dass der Vorgabewert für die Betriebstemperatur während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der nach einem vorgegebenen Zeitpunkt während des Betriebszeitraums liegt, erhöht wird. Eine entsprechende Anlage (100) ist ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Erfindung.



**Fig. 4**

**EP 4 345 191 A1**

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anlage zur Herstellung eines Wasserstoff enthaltenden Produkts unter Einsatz einer Elektrolyse.

### Hintergrund der Erfindung

**[0002]** Zur Herstellung von Wasserstoff im großtechnischen Maßstab ist eine Reihe unterschiedlicher Verfahren bekannt und in gängigen Nachschlagewerken, beispielsweise im Artikel "Hydrogen" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 15. Juni 2000, DOI: 10.1002/14356007.a13\_297, Abschnitt 4, "Production", beschrieben. Die Herstellung von Wasserstoff kann durch Umsetzung von gasförmigen, festen oder flüssigen Kohlenstoffquellen wie Erdgas, Naphtha oder Kohle erfolgen. Ein weiterer Weg zur Herstellung von Wasserstoff aus entsprechenden Kohlenstoffquellen umfasst die katalytische partielle Oxidation (POX, Partial Oxidation) und die katalytische Reformierung in unterschiedlichen Ausgestaltungen wie beispielsweise Dampfreformierung oder autotherme Reformierung. Auch kombinierte Verfahren können hierbei verwendet werden.

**[0003]** Neben derartigen Synthesewegen kann Wasserstoff aber auch elektrolytisch aus Wasser hergestellt werden, wie in dem erwähnten Artikel in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry insbesondere in Abschnitt 4.2, "Electrolysis" erläutert.

**[0004]** Bei der klassischen Wasserelektrolyse wird eine wässrige alkalische Lösung, typischerweise von Kaliumhydroxid, als Elektrolyt verwendet (AEL, alkalische Elektrolyse). Die Elektrolyse mit einer uni- oder bipolaren Elektrodenanordnung erfolgt hierbei bei Atmosphärendruck oder im industriellen Maßstab auch bei einem Überdruck von bis zu 30 bar. Neuere Entwicklungen bei der Wasserelektrolyse umfassen die Verwendung von anionen- oder protonenleitenden Ionenaustauschmembranen bzw. Anionen- oder Protonenaustauschmembranen (AEM, Anion Exchange Membrane; PEM, Proton Exchange Membrane). Diese Verfahren zählen zu den sogenannten Niedertemperaturverfahren, bei denen das zu elektrolysierende Wasser in der Flüssigphase vorliegt. Die vorliegende Erfindung betrifft insbesondere die Wasserelektrolyse, und allgemein Niedertemperaturelektrolysen, wobei beliebige Separatoren (wie Diaphragmen in der alkalischen Elektrolyse und Membranen bei Elektrolysen mit der Protonen- oder Anionenaustauschmembran) zum Einsatz kommen. Spezifischere Ausgestaltungen der Erfindung erfolgen entweder in Form der alkalischen Elektrolyse oder unter Verwendung von anionen- oder protonenleitenden Ionenaustauschmembranen.

**[0005]** Daneben kann auch eine sogenannte Hochtemperaturelektrolyse vorgenommen werden, die ebenfalls mit alkalischen Elektrolyten (also als AEL) mit angepassten Membranen, beispielsweise Polysulfonmembranen, sowie unter Verwendung von Festoxidele-

ktrolysezellen (SOEC, Solid Oxide Electrolysis Cells) und Sauererstoffionen leitenden Hochtemperaturmaterialien durchgeführt werden kann. Diese kommen im Rahmen der vorliegenden Erfindung nicht oder allenfalls zusätzlich zum Einsatz. Letztere Materialien umfassen insbesondere dotiertes Zirkondioxid oder dotierte Oxide anderer seltener Erden, die bei mehr als 600°C technisch signifikant leitfähig werden. Zu entsprechenden Verfahren sei auf Fachliteratur wie Hauch et.al., "Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis", Science 2020, Bd. 370, Nr. 6513, und Ebbesen et. al., "Poisoning of Solid Oxide Electrolysis Cells by Impurities", J. Electrochem. Soc. 2010, Bd. 157, Nr. 10, verwiesen.

**[0006]** Der technische Hintergrund und Ausgestaltungen entsprechender Elektrolysen ist beispielsweise in den Absätzen [0019] bis [0024] der EP 3 766 831 A1 beschrieben, auf die an dieser Stelle ausdrücklich Bezug genommen wird, um sie dadurch in vollem Umfang in die Beschreibung aufzunehmen.

**[0007]** Zur elektrochemischen Herstellung von Kohlenmonoxid aus Kohlendioxid kann ebenfalls eine Hochtemperaturelektrolyse, die unter Verwendung einer oder mehrerer Festoxid-Elektrolysezellen durchgeführt wird, zum Einsatz kommen. Hierbei bilden sich Sauerstoff auf der Anodenseite und Kohlenmonoxid auf der Kathodenseite. Beispielsweise wird auf die WO 2014/154253 A1, die WO 2013/131778 A2, die WO 2015/014527 A1 und die EP 2 940 773 A1 verwiesen.

**[0008]** Die vorliegende Erfindung stellt sich die Aufgabe, die Herstellung von Wasserstoff bzw. Wasserstoff enthaltenden Produkten (ein Wasserstoff enthaltendes Produkt kann dabei ein Gemisch aus Wasserstoff und weiteren Komponenten oder reinen Wasserstoff darstellen) unter Einsatz einer Elektrolyse zu verbessern.

### Offenbarung der Erfindung

**[0009]** Vor diesem Hintergrund schlägt die vorliegende Erfindung ein Verfahren und eine Anlage zur Gewinnung eines wasserstoffhaltigen Produkts unter Einsatz einer Elektrolyse mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche vor. Ausgestaltungen sind jeweils Gegenstand der abhängigen Ansprüche und der nachfolgenden Beschreibung.

**[0010]** Ist nachfolgend von "einer" Elektrolyse bzw. Elektrolysezelle im Singular die Rede, versteht sich, dass Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung mit mehreren Elektrolysezellen realisiert sind, wobei entsprechende Elektrolysezelle insbesondere Teil eines Elektrolysestapels (Zellstapel usw., engl. Stack) bekannter Art sein können, in denen solche Elektrolysezellen in Mehrzahl vorhanden sind. In einem derartigen Elektrolysestapel kann eine Vielzahl von Anordnungen aus jeweils Anode, Elektrolyt und Kathode bereitgestellt sein, wobei jeweils Mittel zur Einspeisung bzw. Entnahme der jeweiligen zu bearbeitenden bzw. bearbeiteten Fluide an der Anoden- und Kathodenseite bereitgestellt sind. Diese sind dabei mit Einspeise- bzw. Sammelleitungen verbunden, die

den gesamten Elektrolysestapel versorgen. Ist nachfolgend von "einem" Elektrolysestapel im Singular die Rede, versteht sich gleichermaßen, dass Ausgestaltungen mit einem oder mehreren Elektrolysestapeln gemeint sein können.

**[0011]** Es ist bekannt, dass Elektrolysezellen nach ihrer Inbetriebnahme eine stetige Degradation erfahren. Diese Degradation führt unter anderem dazu, dass die Zellenspannung bei konstanter Stromdichte im Laufe der Zeit ansteigt oder dass die Stromdichte bei konstanter Spannung im Laufe der Zeit abnimmt. Bis heute sind die Degradationsmechanismen, die zu diesem Phänomen führen, nicht vollständig geklärt. Aus der Literatur geht jedoch hervor, dass es eindeutige Faktoren gibt, wie z.B. höhere Betriebstemperaturen und/oder größere Lastschwankungen, die zu einer beschleunigten Degradation der Zellen führt.

**[0012]** Heutzutage werden Elektrolyseanlagen während ihrer gesamten Lebensdauer bei konstantem Druck und konstanter Temperatur betrieben. Die Temperatur der Elektrolysezellen kann z.B. durch den Strom oder die Eintrittstemperatur eines Kühlmediums, z.B. Wasser, das den Elektrolysezellen zugeführt wird, gesteuert werden. Die vorliegende Erfindung schlägt nun jedoch in Abkehr vom Bekannten einen Betrieb einer Elektrolyse vor, der umfasst, dass die Betriebstemperatur eines Elektrolysestapels zu einem bestimmten Zeitpunkt während seiner Lebensdauer erhöht wird, um seine Leistungsver schlechterung auszugleichen.

**[0013]** In dem erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren zur Herstellung eines Wasserstoff enthaltenden Produkts unter Einsatz einer Elektrolyse ist dabei vorgesehen, dass die Elektrolyse unter Verwendung eines eine Vielzahl von Elektrolysezellen aufweisenden Elektrolysestapels durchgeführt wird, wobei die Elektrolysezellen während eines kontinuierlichen oder eines diskontinuierlichen Produktionszeitraums zwischen einem ersten Zeitpunkt und einem zweiten Zeitpunkt mit einer an den Elektrolysestapel angelegten Elektrolysespannung beaufschlagt werden, und dass die Elektrolysezellen während des Produktionszeitraums mit einer auf einen Vorgabewert eingestellten Betriebstemperatur betrieben werden. Gemäß Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung ist vorgesehen, dass der Vorgabewert für die Betriebstemperatur während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der nach einem vorgegebenen Zeitpunkt während des Betriebszeitraums liegt, erhöht wird.

**[0014]** Unter einem "diskontinuierlichen" Zeitraum wird hierbei insbesondere ein Gesamtzeitraum verstanden, der sich aus Teilzeiträumen zusammensetzt. Im vorliegenden Fall kann ein Betriebszeitraum, in dem eine Elektrolyse durchgeführt, und daher die Elektrolysezellen mit Strom und entsprechenden Medien beaufschlagt werden, durch unterschiedliche andere Zeiträume, bspw. Wartungs- oder Reparaturzeiträume, unterbrochen sein und dennoch einen Gesamtzeitraum bilden, der insbesondere zwischen einem Lebens- bzw. Betriebsdauer-

beginn (engl. Begin of Life, BoL) und einem Lebens- bzw. Betriebsdauerende (engl. End of Life, EoL) liegt.

**[0015]** Eine "Erhöhung" eines Werts kann im Rahmen der vorliegenden Erfindung insbesondere eine graduelle, stufenweise, oder einer bestimmten mathematischen Funktion entsprechende Erhöhung sein. Da diese in einem diskontinuierlichen Zeitraum erfolgen kann, kann sie auch von Zeiträumen einer Nichterhöhung oder Verringerung unterbrochen sein.

**[0016]** Durch den Einsatz der vorliegenden Erfindung und entsprechender Ausgestaltungen können die Lebensdauer des Elektrolysestapels verlängert und gleichzeitig die maximale Spannung und/oder Leistungsaufnahme des Elektrolysestapels begrenzt werden. Elektrolysestapel können über einen längeren Zeitraum genutzt werden, ohne eine bestimmte Schwellenspannung zu überschreiten, wobei die Nennproduktionsrate und/oder Stromdichte der Elektrolyseanlage zu erreichen ist. Ein Overengineering von Stromversorgungseinheiten kann, wie auch unten unter Bezugnahme auf Ausführungsformen der Erfindung weiter erläutert, reduziert werden, ohne die Nutzungsdauer des Elektrolysestapels hierdurch zu verkürzen.

**[0017]** In Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung wird der Zeitpunkt, ab dem der Vorgabewert für die Betriebstemperatur erhöht wird, d.h. ein entsprechender kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Zeitraum beginnt, auf Grundlage wenigstens einer Kenngröße vorgegeben, die mit einem Degradationsgrad der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels korreliert. Weitere Details werden ebenfalls weiter unten erläutert. Insbesondere ist es hierdurch möglich, einen entsprechenden Zeitpunkt exakt zu wählen und dem realen Betrieb anzupassen.

**[0018]** Es kann vorgesehen sein, dass zumindest während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der vor dem vorgegebenen Zeitpunkt liegt, eine Betriebsspannung, mit der die Elektrolysezellen betrieben werden, erhöht wird, wobei die Kenngröße, die mit einem Degradationsgrad der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels korreliert, ein Erreichen oder Überschreiten eines Schwellwerts durch die Betriebsspannung ist. Eine derartige Erhöhung kann vorteilhafterweise dazu vorgesehen sein, eine Degradation der Elektrolysezellen auszugleichen. Sie kann in Abhängigkeit beispielsweise von einer Produktionsrate des Elektrolyseprodukts erfolgen, insbesondere um diese konstant zu halten.

**[0019]** In einer alternativen Ausgestaltung kann während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der vor dem vorgegebenen Zeitpunkt liegt, eine maximal erreichbare Stromstärke, bei der die Elektrolysezellen betrieben werden, verringert werden, wobei die Kenngröße, die mit einem Degradationsgrad der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels korreliert, ein Erreichen oder Unterschreiten eines Schwellwerts durch die maximal erreichbare Stromstärke ist.

**[0020]** Im Rahmen der vorliegenden Erfindung kann

insbesondere vorgesehen sein, dass die maximal erreichbare Betriebsspannung, mit der die Elektrolysezellen betrieben werden, während des Teilzeitraums, der nach dem vorgegebenen Zeitpunkt liegt, nicht mehr erhöht wird. Entsprechendes kann auch für die maximal erreichbare Stromstärke vorgesehen sein. Hierdurch wird die entsprechende Spannung bzw. der Strom begrenzt und eine weitere Degradation kann durch die in Ausgestaltungen der Erfindung vorgesehene Erhöhung der Betriebstemperatur kompensiert werden.

**[0021]** Ein entsprechender Schwellwert für eine Betriebsspannung kann insbesondere bei 101 bis 150% oder 104 bis 120% eines anfänglichen Werts der Betriebsspannung liegen. Damit ist es möglich, entsprechende Stromversorgungseinheiten lediglich so leistungsfähig bereitzustellen, dass sie diese Spannungssteigerung zulassen. Ein Overdesign kann vermieden werden. Entsprechend kann ein entsprechender Schwellwert für eine Stromstärke bei 50 bis 99% oder 80 bis 96% des anfänglichen Werts der Stromstärke liegen.

**[0022]** In Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung kann die Elektrolyse unter Verwendung von Elektrolysemembranen durchgeführt werden, wobei die Elektrolysemembranen und/oder eine oder mehrere weitere Komponenten der Elektrolysezellen dazu eingerichtet sind, durch die Elektrolysemembranen permeierenden Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser umzusetzen.

**[0023]** Bei Verwendung einer membranbasierten Elektrolyse (z.B. vom Typ einer Protonenaustauschmembran oder Anionenaustauschmembran) kann dabei ein entsprechendes Material in die Anordnung aus Membran und Elektroden eingebracht werden. Dieses ist dafür eingerichtet, den in die Membran zur Anodenseite der Elektrolysezelle eindringenden Wasserstoff mit Sauerstoff zu rekombinieren, um Wasser zu bilden. Eine Degradation kann nämlich zu einer Ausdünnung der Membran führen und damit den Gasdurchtritt durch die Membran erhöhen. Außerdem kann ggf. die Permeation von Wasserstoff und Sauerstoff durch typisches Membranmaterial bei höheren Temperaturen verstärkt werden. Dementsprechend kann es beim Betrieb einer membranbasierten Elektrolyseanlage bei erhöhter Temperatur während eines Zustands hoher Degradation vorteilhaft sein, ein entsprechendes Mittel zur Rekombination von permeiertem Sauerstoff und Wasserstoff einzubauen, um Sicherheitsauflagen zu erfüllen, wie z.B. die Höchstgrenze von Wasserstoff in Sauerstoff. Bei dem Mittel zur Rekombination von Sauerstoff und Wasserstoff kann es sich um einen Katalysator, z.B. auf Platinbasis, handeln, der in die Membran eingebettet, mit dem anodenseitigen Katalysator vermischt, oder als dünne Schicht zwischen dem Anodenkatalysator und der Membran aufgebracht sein kann.

**[0024]** Mit anderen Worten können die Elektrolysemembranen und/oder eine oder mehrere weitere Komponenten der Elektrolysezellen, die dafür eingerichtet sind, den durch die Elektrolysemembranen permeierenden Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser umzusetzen,

einen platinbasierten Katalysator aufweisen.

**[0025]** Alternative Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung können auch eine Verwendung einer alkalischen Elektrolyse eingerichtet sein, d.h. die Elektrolyse kann unter Verwendung von Elektrolysezellen durchgeführt werden, die für eine alkalische Wasserelektrolyse eingerichtet sind, wie sie grundsätzlich aus dem Stand der Technik bekannt sind.

**[0026]** In entsprechenden Verfahren kann in Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung insbesondere vorgesehen sein, dass eine anodenseitige Wasserstoffkonzentration überwacht und der Betrieb der Elektrolyse in Abhängigkeit hiervon angepasst wird.

**[0027]** Die Anpassung des Betriebs kann insbesondere durch eine Änderung der Betriebsbedingungen, z.B. der Zellspannung und der Zelltemperatur, erfolgen, so dass ein Schwellenwert der Wasserstoffkonzentration an der Anode nicht überschritten wird. Der Schwellenwert kann insbesondere unterhalb der unteren Explosionsgrenze von 4% liegen. Es können aber auch Schwellenwerte bei 2% oder darunter liegen, um einen entsprechenden Sicherheitspuffer bereitzustellen.

**[0028]** Es ist zu erwarten, dass die Wasserstoffkonzentration an der Anodenseite bei hohen Temperaturen und niedrigen Stromdichten besonders hoch ist. Daher kann die gemessene Konzentration verwendet werden, um eine Obergrenze für die Temperatur oder eine Untergrenze für die Zellspannung und/oder Stromdichte festzulegen. Insbesondere dann, wenn ein Betrieb bei geringer Belastung, d.h. bei niedriger Spannung und Stromdichte, gewünscht ist, kann eine Senkung der Temperatur zur Begrenzung der Wasserstoffkonzentration an der Anode vorteilhaft sein.

**[0029]** Somit kann der Betrieb der Elektrolyse gemäß Ausgestaltungen der Erfindung angepasst oder weiter angepasst werden, wenn die anodenseitige Wasserstoffkonzentration einen Wert von 2% oder 4% überschreitet.

**[0030]** In Ausgestaltungen der Erfindung kann die Elektrolyse zumindest zeitweise während des Betriebszeitraums mit subnominalen Stromdichten betrieben werden, wobei die Betriebstemperatur in Abhängigkeit von den Stromdichten eingestellt wird.

**[0031]** Insbesondere beim Betrieb einer Elektrolyseanlage mit schwankenden Produktionsraten kann die Temperatur in Abhängigkeit von der vorübergehend angelegten Spannung variiert werden. Beim Betrieb mit einer Stromdichte, die niedriger ist als die Nennstromdichte des Elektrolysestapels, kann der Elektrolysestapel bei einer niedrigeren Temperatur betrieben werden als der Betriebstemperatur, die bei gleicher Degradation bzw. gleichem Degradationsniveau und bei Nennstromdichte verwendet wird. Der Betrieb bei dieser niedrigeren Stromdichte kann trotz des gegebenen Degradationsniveaus ohne Erhöhung der Temperatur oder Überschreitung der zuvor festgelegten Schwellenspannung möglich sein. Der Betrieb bei einer niedrigeren Temperatur kann den Gasübergang reduzieren, der bei niedrigen Stromdichten kritisch sein kann, und er kann die Degradation

verringern.

**[0032]** Die Erhöhung der Betriebstemperatur kann in Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung durch Verringern eines Kühlmittelflusses durch die und/oder Erhöhen einer Kühlmittleintrittstemperatur in die Elektrolysezellen erfolgen.

**[0033]** Wird ein Elektrolysestapel bei höheren Temperaturen als der Nenntemperatur betrieben, so kann die höhere Betriebstemperatur also durch eine Verringerung des Kühlmitteldurchflusses und/oder eine Erhöhung der Temperatur des in den Elektrolysestapel eintretenden Kühlmittels erreicht werden. Wird überstöchiometrisches Wasser zur Steuerung der Zellentemperatur verwendet, kann dieses Wasser gereinigt werden, z.B. durch Verwendung eines Ionenaustauscharzes. Vorzugsweise darf die Temperatur des in die Reinigungseinheit eintretenden Wassers eine Schwellentemperatur, z.B. 60°C, nicht überschreiten.

**[0034]** Um die maximale Betriebstemperatur des verwendeten Harzes einzuhalten, kann die Elektrolysestapeltemperatur durch einen Bypass über den Wärmetauscher, der das Wasser kühlt, gesteuert werden. Allgemeiner gesprochen kann den Elektrolysezellen zugeführtes Wasser zu einem einstellbaren ersten Anteil zuvor einer Temperier- und einer Reinigungseinrichtung zugeführt werden, und in einem verbleibenden Rest um die Temperier- und Reinigungseinrichtung (oder nur die Temperier- oder die Reinigungseinrichtung) herumgeführt und stromab hiervon wieder mit dem ersten Anteil vereinigt werden. Somit kann zumindest ein Teil des Wassers, welches um die Temperiereinheit herumgeführt wird, auch um die Reinigungseinheit herumgeführt werden, sodass das Wasser am Eintritt des Elektrolysestapels eine höhere Temperatur haben kann als das Wasser am Eintritt der Reinigungseinheit. Beliebige Bypässe entsprechender Art sind möglich und können in Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung vorgesehen sein.

**[0035]** Es kann also beim Betrieb des Elektrolysestapels mit einer höheren Temperatur als seiner Nenntemperatur zu einem anfänglichen Zeitpunkt mindestens ein Teil des Wassers zum Wärmetauscher und zum Harz geleitet werden, während mindestens ein anderer Teil des Wassers den Wärmetauscher und das Harz umgeht. Optional kann ein Teil des Anoden- und/oder Kathodenstroms aus dem System abgeleitet werden oder den Wärmetauscher und die Wasserreinigungseinheit umgehen.

**[0036]** Die erfindungsgemäß vorgeschlagene Anlage zur Herstellung eines Wasserstoff enthaltenden Produkts ist zur Durchführung einer Elektrolyse eingerichtet und weist für die Durchführung der Elektrolyse einen eine Vielzahl von Elektrolysezellen aufweisenden Elektrolysestapels auf. Sie ist dafür eingerichtet, die Elektrolysezellen während eines kontinuierlichen oder eines diskontinuierlichen Produktionszeitraums zwischen einem ersten Zeitpunkt und einem zweiten Zeitpunkt mit einer an den Elektrolysestapel angelegten Elektrolysespannung

zu beaufschlagen und die Elektrolysezellen während des Produktionszeitraums mit einer auf einen Vorgabewert eingestellten Betriebstemperatur zu betreiben.

**[0037]** In einer derartigen Anlage sind Mittel bereitgestellt, die dafür eingerichtet sind, den Vorgabewert für die Betriebstemperatur während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der nach einem vorgegebenen Zeitpunkt während des Betriebszeitraums liegt, zu erhöhen.

**[0038]** Zu weiteren Merkmalen und Vorteilen einer entsprechenden Anlage und Ausgestaltungen hiervon sei auf die obigen Erläuterungen betreffend das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verfahren und seine Ausgestaltungen ausdrücklich verwiesen, da diese hierfür in gleicher Weise gelten.

**[0039]** Entsprechendes gilt auch für eine Anlage, die gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung dazu eingerichtet ist, ein Verfahren gemäß einer beliebigen Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung durchzuführen.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnung

**[0040]** Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend rein beispielhaft unter Bezugnahme auf die beigefügte Zeichnung beschrieben, wobei

**[0041]** Figuren 1 bis 5 zeigen Diagramme, anhand derer der Hintergrund und Merkmale von Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung veranschaulicht sind, und

**[0042]** Figur 6 eine Anlage gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung veranschaulicht.

#### Ausführungsformen der Erfindung

**[0043]** Die nachfolgend beschriebenen Ausführungsformen werden lediglich zu dem Zweck beschrieben, den Leser beim Verständnis der beanspruchten und zuvor erläuterten Merkmale zu unterstützen. Sie stellen lediglich repräsentative Beispiele dar und sollen hinsichtlich der Merkmale der Erfindung nicht abschließend und/oder beschränkend betrachtet werden. Es versteht sich, dass die zuvor und nachfolgend beschriebenen Vorteile, Ausführungsformen, Beispiele, Funktionen, Merkmale, Strukturen und/oder anderen Aspekte nicht als Beschränkungen des Umfangs der Erfindung, wie er in den Ansprüchen definiert ist, oder als Beschränkungen von Äquivalenten zu den Ansprüchen zu betrachten sind, und dass andere Ausführungsformen verwendet und Änderungen vorgenommen werden können, ohne vom Umfang der beanspruchten Erfindung abzuweichen.

**[0044]** Unterschiedliche Ausführungsformen der Erfindung können weitere zweckmäßige Kombinationen der beschriebenen Elemente, Komponenten, Merkmale, Teile, Schritte, Mittel usw. umfassen, aufweisen, aus ihnen bestehen oder im Wesentlichen aus ihnen bestehen, auch wenn solche Kombinationen hier nicht spezifisch beschrieben sind. Darüber hinaus kann die Offenbarung andere Erfindungen umfassen, die gegenwärtig nicht beansprucht sind, die aber in Zukunft beansprucht werden

können, insbesondere wenn sie vom Umfang der unabhängigen Ansprüche umfasst sind.

**[0045]** Erläuterungen, die sich auf Vorrichtungen, Apparate, Anordnungen, Systeme usw. gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung beziehen, können auch für Verfahren, Prozesse, Methoden usw. gemäß den Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung gelten und umgekehrt. Gleiche, gleich wirkende, in ihrer Funktion einander entsprechende, baulich identisch oder vergleichbar aufgebaute Elemente, Verfahrensschritte usw. können mit identischen Bezugszeichen angegeben sein.

**[0046]** Die Aufspaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff in einer Elektrolyse ist ein energieaufwändiger Prozess. Bei der Wasserelektrolyse wird die für die Wasserspaltungsreaktion erforderliche Energie durch Anlegen eines elektrischen Stroms an eine Anordnung von Elektrolysezellen, den soeben erläuterten Elektrolysestapel, bereitgestellt. Die durch den Elektrolysestapel verbrauchte elektrische Energie kann als Produkt aus dem durch jede Elektrolysezelle fließenden Strom, der Spannung über jede Elektrolysezelle und der Anzahl der Elektrolysezellen im Elektrolysestapel berechnet werden.

**[0047]** Die Spannung über jede Elektrolysezelle wird auch als Zellspannung  $U_{\text{cell}}$  bezeichnet und kann für jede Elektrolysezelle in einem Elektrolysestapel als annähernd gleich angenommen werden. Die Zellspannung lässt sich in die reversible Spannung  $U_{\text{rev}}$ , d.h. die thermodynamische Mindestspannung, bei der eine Reaktion stattfinden kann, und eine Überspannung aufteilen. Die Überspannung umfasst die Aktivierungsüberspannung an der Katalysatoroberfläche sowie die Spannungen, die erforderlich sind, um den Zellstrom über die ohmschen Widerstände der verschiedenen Komponenten der Elektrolysezelle zu leiten, sowie sonstige Überspannungen durch Massentransportlimitierungen. Im Gegensatz zur reversiblen Spannung steigt daher die Überspannung mit der Stromdichte.

**[0048]** Beim Betrieb mit einer industriell relevanten Stromdichte ist die Zellspannung einer Elektrolysezelle größer als ihre thermoneutrale Spannung  $U_{\text{tn}}$ , d.h. die Spannung, bei der die in die Elektrolysezelle übertragene Energie (d.h. die übertragene Ladung multipliziert mit der angelegten Spannung) größer ist als die Reaktionsenthalpie. Dementsprechend wird in den Elektrolysestapels Wärme erzeugt und über ein Kühlmedium, in der Regel nicht umgewandeltes Wasser, abgeführt.

**[0049]** Typische Kurven für die reversible Spannung, die thermoneutrale Spannung und die Zellspannung über der Stromdichte sind in Figur 1 dargestellt. Die Beziehung zwischen Zellspannung und Stromdichte wird oft als U-i-Kurve bezeichnet. Wie in Figur 2 veranschaulicht, die eine Stromdichte in  $\text{A}/\text{cm}^2$  auf der Horizontalachse gegen die Zellspannung in V auf der Vertikalachse darstellt, und in der von oben nach unten entsprechende Kurven für Temperaturen von 30, 40, 55, 60, 70, 80 und 90°C gezeigt sind, besteht eine Temperaturab-

hängigkeit der U-i-Kurve.

**[0050]** Die Zellspannung ist nicht nur eine Funktion der Stromdichte, sondern auch der Betriebstemperatur. Diese Beziehung ist insbesondere im Rahmen der vorliegenden Erfindung relevant. Mit steigender Betriebstemperatur sinkt die reversible Spannung aufgrund der zugrunde liegenden Thermodynamik der Wasserspaltungsreaktion. Darüber hinaus nehmen die verschiedenen Widerstände innerhalb der Elektrolysezelle mit steigender Temperatur ab, was ebenfalls zu einem Rückgang der Überspannung führt. Infolgedessen sinkt die Zellspannung und damit der spezifische Energieverbrauch der Zelle mit steigender Betriebstemperatur. Es hat sich jedoch gezeigt, dass eine Erhöhung der Temperatur die Degradation der Elektrolysezelle beschleunigt, so dass typischerweise ein Kompromiss zwischen Zelleneffizienz und Lebensdauer geschlossen werden muss.

**[0051]** Wie erwähnt, ist bekannt, dass Elektrolysezellen nach ihrer Inbetriebnahme eine stetige Degradation erfahren. Diese Degradation führt unter anderem dazu, dass die Zellenspannung bei konstanter Stromdichte im Laufe der Zeit ansteigt, oder dass die Stromdichte bei konstanter Spannung im Laufe der Zeit abnimmt. Bis heute sind die Degradationsmechanismen, die zu diesem Phänomen führen, nicht vollständig geklärt.

**[0052]** Aus der Literatur geht jedoch hervor, dass es eindeutige Faktoren gibt, wie z.B. höhere Betriebstemperaturen und/oder größere Lastschwankungen, die zu einer beschleunigten Degradation der Zellen führen.

**[0053]** Wie ebenfalls erwähnt, werden Elektrolyseanlagen während ihrer gesamten Lebensdauer bei konstantem Druck und konstanter Temperatur betrieben, wobei die Temperatur der Elektrolysezellen z.B. durch den Strom oder die Eintrittstemperatur eines Kühlmediums, z.B. Wasser, das der Elektrolysezellen zugeführt wird, gesteuert werden kann. Die vorliegende Erfindung umfasst eine Abkehr hiervon.

**[0054]** In der industriellen Praxis ist es häufig erwünscht, die Produktionsrate einer Anlage konstant zu halten. Bei Elektrolyseanlagen entspricht dies in etwa einer konstanten Stromdichte. Um die Degradation der Zelle auszugleichen, wird die Zellspannung mit der Zeit erhöht. Daher steigt bei gleichbleibender Wasserstoffproduktionsrate oder Stromdichte der Stromverbrauch des Elektrolysestapels im Laufe der Zeit an, so dass die verwendete Stromversorgungseinheit in der Lage sein muss, mit zunehmender Alterung der Zellen den gleichen elektrischen Strom bei höherer Spannung zu liefern. In der industriellen Praxis ist es wünschenswert, die Anlagen mit einer konstanten Produktionsrate zu betreiben bzw. die maximale Produktionsrate konstant zu halten, wenn ein fluktuierender Betrieb angestrebt wird.

**[0055]** Aufgrund der Degradation der Zellen steigt die Betriebsspannung und damit der Stromverbrauch von Elektrolyseanlagen mit der Zeit an, wenn eine konstante Stromdichte oder Produktionsrate beibehalten wird. Dies ist beispielsweise in Figur 3 veranschaulicht, in der auf

einer Horizontalachse eine Zeit zwischen Lebensdauerbeginn (engl. Begin of Life, BoL) und Lebensdauerende (engl. End of Life, EoL), auf der linken Vertikalachse eine Stromdichte und auf der rechten Vertikalachse eine Zellspannung dargestellt sind. Die obere Kurve zeigt die Zellspannung, die untere Kurve die Stromdichte über einen entsprechenden Zeitraum.

**[0056]** Als Kriterium für den Austausch des Elektrolysestapels wird häufig die Spannung genannt, die erforderlich ist, um die nominale Wasserstoffproduktion der Anlage aufrechtzuerhalten. Ein Austausch erfolgt dann, wenn ein bestimmter Schwellenwert erreicht wird. Dieser Schwellenwert kann eine feste Spannung, z.B. 2,2 V, oder eine prozentuale Degradation, z.B. 10%, sein.

**[0057]** Eine Stromversorgungseinheit muss mit zunehmender Zellenalterung in der Lage sein, mehr Leistung bei einer höheren Spannung zu liefern, was zumindest ein gewisses Maß an Overdesign der Stromversorgungseinheit gegenüber den Anforderungen zu Beginn der Lebensdauer der Anlage erfordert. Das Kriterium für den Austausch des Elektrolysestapels kann daher auch darin bestehen, dass der Leistungsbedarf des Elektrolysestapels größer als die maximale Ausgangsleistung der Stromversorgungseinheit bei einem bestimmten Strom wird, oder zu groß für einen wirtschaftlichen Betrieb wird. Allgemeiner kann irgendein Kriterium berücksichtigt werden, das damit zusammenhängt, dass die Spannung über den Elektrolysestapel und/oder ein Teil des Elektrolysestapels einen bestimmten oberen Schwellenwert oder die maximal erreichbare Stromstärke einen bestimmten unteren Schwellenwert erreicht.

**[0058]** Die vorliegende Erfindung schlägt einen Betrieb einer Elektrolyse vor, der umfasst, dass die Betriebstemperatur eines Elektrolysestapels zu einem bestimmten Zeitpunkt während seiner Lebensdauer erhöht wird, um seine Leistungsverschlechterung auszugleichen. Hierdurch kann die Lebensdauer des Elektrolysestapels verlängert und gleichzeitig die maximale Spannung und/oder Leistungsaufnahme des Elektrolysestapels begrenzt werden. Wie erwähnt, kann dies umfassen, dass die Temperatur ab einem bestimmten Punkt erhöht wird, bis zu welchem ein Degradationsausgleich mittels einer Spannungserhöhung oder einer Verminderung der maximal zu erreichenden Stromstärke erfolgt.

**[0059]** Eine Erhöhung der Betriebstemperatur kann zu einer beschleunigten Degradation des Elektrolysestapels führen. Daher kann in Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung ab dem Beginn der Lebensdauer des Elektrolysestapels der Leistungsabfall vorzugsweise zunächst durch eine Erhöhung der Elektrolysestapelspannung bis zum Erreichen einer Schwellenspannung ausgeglichen werden.

**[0060]** In einer derartigen Ausgestaltung kann also vorgesehen sein, ab dem Beginn des Betriebszeitraums eine Betriebsspannung der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels so lange zu erhöhen, bis eine Schwellenspannung erreicht ist, die in Abhängigkeit von einer Nennspannung der Elektrolysezellen des Elektrolyse-

stapels ausgewählt ist. Diese Erhöhung kann wiederum während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Zeitraums erfolgen, d.h. die Spannung kann zwischenzeitlich auch wieder verringert werden, beispielsweise um eine Produktionsrate zu reduzieren oder weil der Abbau reversibler Degradationseffekte eine entsprechende Verringerung ermöglicht. Insgesamt wird jedoch eine Erhöhung vorgenommen, d.h. insbesondere die Spannungsmaxima erhöhen sich vor dem Beginn des Betriebszeitraums, bis diese einen Schwellenwert erreichen. Dies kann über einen Zeitraum von Jahren erfolgen. Alternativ oder zusätzlich kann ab dem Beginn des Betriebszeitraums eine Betriebsstromdichte der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels so lange verringert werden, bis eine untere Schwellenstromdichte erreicht ist. Mit anderen Worten kann während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der vor dem vorgegebenen Zeitpunkt liegt, eine maximal erreichbare Stromstärke, bei der die Elektrolysezellen betrieben werden, verringert wird, wobei die Kenngröße, die mit einem Degradationsgrad der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels korreliert, ein Erreichen oder Unterschreiten eines Schwellenwerts durch die maximal erreichbare Stromstärke ist. Wiederum kann eine zwischenzeitliche Erhöhung der Stromstärke erfolgen, soweit die Stromstärkemaxima sich bis zum Erreichen des Schwellenwerts verringern.

**[0061]** Die Schwellenspannung kann in Ausgestaltungen der Erfindung, wie erwähnt, in Form eines prozentualen Werts der Nennspannung zu Beginn des Betriebszeitraums ausgedrückt werden, und das Kriterium kann auf eine oder mehrere Spannungen angewandt werden, die jeweils über eine oder mehrere Zellen gemessen werden. Entsprechend kann ein Stromstärkenschwellenwert als prozentualer Wert eines anfänglichen Werts ausgedrückt werden.

**[0062]** Wenn andernfalls die Schwellenspannung überschritten würde, kann ab einem entsprechenden Zeitraum die Elektrolysestapeltemperatur erhöht werden, um das Produktionsziel zu erreichen, ohne das Spannungskriterium zu verletzen.

**[0063]** Die vorgeschlagene Strategie ermöglicht es, mit einem Elektrolysestapel, der einen gewissen Grad an Degradation erfahren hat, Produktionsraten zu erzielen, die innerhalb des nominalen Temperatur- und Spannungsbereichs nicht mehr erreicht werden können. Daher ermöglicht die vorgeschlagene Strategie eine Verlängerung der Betriebslebensdauer des Elektrolysestapels bei gleichzeitiger Einhaltung der Betriebsbedingungen, wie z.B. der erreichbaren Produktionsrate.

**[0064]** Das resultierende Temperatur- und Spannungsprofil über die Zeit wird beispielhaft für den stationären Betrieb in Figur 4 dargestellt, in der ein Betriebszeitraum in Jahren auf der Horizontalachse, eine Temperaturdifferenz zwischen der momentanen Betriebstemperatur und der Betriebstemperatur zum Beginn der Lebensdauer bzw. des dargestellten Betriebszeitraums in K auf der linken Vertikalachse, und ein Verhältnis der

verwendeten zur nominalen Betriebsspannung in Prozent auf der rechten Vertikalachse veranschaulicht ist. Die obere Kurve bezieht sich auf das Spannungsverhältnis, die untere auf die Temperaturdifferenz.

**[0065]** Es ist in der Industrie bekannt, dass ein kleiner Teil des bei der Elektrolyse erzeugten Wasserstoffs und Sauerstoffs durch den Separator, der den Anoden- und Kathodenraum trennt, hindurchtreten kann. Der so genannte Wasserstoff-Crossover, d.h. der Übergang von Wasserstoff aus dem Kathoden- in den Anodenraum, kann auf der Anodenseite zu einem Gasgemisch führen, das nahe der unteren Explosionsgrenze von Wasserstoff in Sauerstoff liegt.

**[0066]** Das Crossover-Phänomen kann sich bei höheren Temperaturen noch verstärken. Eine beispielhafte Trajektorie des Wasserstoffs in Sauerstoff an der Anodenseite für die vorgeschlagene Betriebsstrategie ist in Figur 5 veranschaulicht, wo die Horizontalachse der Horizontalachse gemäß Figur 4 entspricht, und auf der Vertikalachse ein prozentualer Gehalt von Wasserstoff in Sauerstoff dargestellt ist. Ausgestaltungen der Erfindung, die bereits zuvor erläutert wurden, können insbesondere dazu verwendet werden, negative Effekte hiervon zu kompensieren.

**[0067]** In Figur 6 ist ein anhand eines stark vereinfachten Anlagendiagramms eine Anlage gemäß einer Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung veranschaulicht. Die Anlage ist insgesamt mit 100 bezeichnet. Die Anlage 100 kann im dargestellten Beispiel zur Elektrolyse unter Verwendung von Protonenaustauschmembranen oder Anionenaustauschmembranen ausgebildet sein, die kathoden- und/oder anodenseitig mit Wasser beaufschlagt werden können. Die Erfindung ist nicht hierauf beschränkt, sondern kann grundsätzlich auch mit Elektrolysezellen verwendet werden, die für eine alkalische Elektrolyse eingerichtet sind. Entsprechende Ausgestaltungen sind hier lediglich aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert dargestellt.

**[0068]** Eine Elektrolysezelle bzw. ein Elektrolysestapel ist mit 10 bezeichnet und weist eine Anodenseite A und eine Kathodenseite C auf. Eine Membran ist mit M veranschaulicht. Der Anlage 100 wird ein Wasserstrom 101 zugeführt, der mit Recycleströmen 102 und 103 vereinigt wird. Gestrichelt veranschaulichte Anteile dieser Recycleströme 102, 103 können zuvor abgezweigt werden. Auch ein Betrieb ohne Recycleströme 102, 103 ist möglich. Auch eine Rückführung der Recycleströme 102, 103 an einer stromabwärtigen Position, wie ebenfalls mittels gestrichelten Pfeilen veranschaulicht, kann vorgesehen sein.

**[0069]** In der in Figur 6 veranschaulichten Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung kann ein variabler Anteil des entsprechend gebildeten Wasserstroms als Bypassstrom 104 abgezweigt werden. Ein Rest 105 wird mittels eines Wärmetauschers 20 gekühlt und zumindest ein Teil des Austrittsstrom des Wärmetauschers 20 wird danach in einer Reinigungseinrichtung 30 aufgereinigt. Nach Wiedervereinigung mit dem Bypassstrom 104 und ggf.

den gestrichelt veranschaulichten Recycleströme 102, 103 bzw. entsprechenden Anteilen hiervon erfolgt eine Aufspaltung in zwei Einsatzströmen 106 zur Anodenseite A bzw. 107 zur Kathodenseite C. Alternativ zur Vereinigung mit den Strömen 102 und 103 kann auch vorgesehen sein, den Wasserstrom 101 stromabwärts des Wärmetauschers 20 oder der Reinigungseinheit 30 der Anlage zuzuführen, oder, wie hier mit Bypässen 104' und 104" veranschaulicht, einzeln um diese herumzuführen. Beliebige Arten von Bypässen sind möglich.

**[0070]** Von der Anodenseite A kann ein Stoffstrom 108, in dem die gasförmigen Anodenprodukte, insbesondere Sauerstoff, und das nicht umgesetzte Wasser enthalten sind, entnommen und einem Gas-Flüssig-Trenner 40 zugeführt werden. In dem Gas-Flüssig-Trenner 40 kann das als der Recyclestrom 102 verwendete Wasser abgetrennt und ein gasförmiges Anodenprodukt 110 erhalten werden. In der Praxis kann das Anodenprodukt, falls keine Abtrennung oder dergleichen vorgesehen ist, aufgrund von Crossover über die Membran in das Anodenprodukt übergegangenen Wasserstoff enthalten.

**[0071]** Von der Kathodenseite C kann ein Stoffstrom 109, in dem die gasförmigen Kathodenprodukte, insbesondere Wasserstoff, und das nicht umgesetzte Wasser enthalten sind, entnommen und einem Gas-Flüssig-Trenner 50 zugeführt werden. In dem Gas-Flüssig-Trenner 50 kann das als der Recyclestrom 103 verwendete Wasser abgetrennt und ein gasförmiges Kathodenprodukt 111 erhalten werden. In der Praxis kann das Kathodenprodukt, analog zu dem Anodenprodukt, falls keine Abtrennung oder dergleichen vorgesehen ist, aufgrund von Crossover über die Membran in das Kathodenprodukt übergegangenen Sauerstoff enthalten.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Wasserstoff enthaltenden Produkts (111) unter Einsatz einer Elektrolyse (10), wobei die Elektrolyse (10) unter Verwendung eines oder mehrerer, eine Vielzahl von Elektrolysezellen aufweisender Elektrolysestapel durchgeführt wird, wobei die Elektrolysezellen während eines kontinuierlichen oder eines diskontinuierlichen Produktionszeitraums zwischen einem ersten Zeitpunkt (BoL) und einem zweiten Zeitpunkt (EoL) mit einer an den Elektrolysestapel angelegten Elektrolysespannung beaufschlagt werden, und wobei die Elektrolysezellen während des Produktionszeitraums mit einer auf einen Vorgabewert eingestellten Betriebstemperatur betrieben werden, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Vorgabewert für die Betriebstemperatur während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der nach einem vorgegebenen Zeitpunkt während des Betriebszeitraums liegt, erhöht wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der vorgege-

- bene Zeitpunkt, ab dem der Vorgabewert für die Betriebstemperatur erhöht wird, auf Grundlage wenigstens einer Kenngröße vorgegeben wird, die mit einem Degradationsgrad der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels korreliert.
- 5
3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem zumindest während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der vor dem vorgegebenen Zeitpunkt liegt, eine Betriebsspannung, mit der die Elektrolysezellen betrieben werden, erhöht wird, wobei die Kenngröße, die mit einem Degradationsgrad der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels korreliert, ein Erreichen oder Überschreiten eines Schwellwerts durch die Betriebsspannung ist.
- 10
4. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem zumindest während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der vor dem vorgegebenen Zeitpunkt liegt, eine maximal erreichbare Stromstärke, bei der die Elektrolysezellen betrieben werden, verringert wird, wobei die Kenngröße, die mit einem Degradationsgrad der Elektrolysezellen des Elektrolysestapels korreliert, ein Erreichen oder Unterschreiten eines Schwellwerts durch die maximal erreichbare Stromstärke ist.
- 15
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, bei dem die maximal zu erreichende Betriebsspannung, mit der die Elektrolysezellen betrieben werden, während des Teilzeitraums, der nach dem vorgegebenen Zeitpunkt liegt, nicht mehr erhöht wird.
- 20
6. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, bei dem der Schwellwert bei 104 bis 120% eines anfänglichen Werts der Betriebsspannung liegt.
- 25
7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Elektrolyse (10) unter Verwendung von Elektrolysemembranen (M) durchgeführt wird, wobei die Elektrolysemembranen (M) und/oder eine oder mehrere weitere Komponenten der Elektrolysezellen dazu eingerichtet sind, durch die Elektrolysemembranen permeierenden Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser umzusetzen.
- 30
8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die Elektrolysemembranen (M) und/oder eine oder mehrere weitere Komponenten der Elektrolysezellen, die dafür eingerichtet sind, den durch die Elektrolysemembranen permeierenden Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser umzusetzen, einen platinbasierten Katalysator aufweisen.
- 35
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem die Elektrolyse (10) unter Verwendung von Elektrolysezellen durchgeführt wird, die für eine alkalische Wasserelektrolyse eingerichtet sind
- 40
10. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem eine anodenseitige Wasserstoffkonzentration überwacht wird und der Betrieb der Elektrolyse (10) in Abhängigkeit hiervon angepasst wird.
- 45
11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem der Betrieb der Elektrolyse (10) angepasst oder weiter angepasst wird, wenn die anodenseitige Wasserstoffkonzentration einen Wert von 2% oder 4% überschreitet.
- 50
12. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Elektrolyse (10) zumindest zeitweise während des Betriebszeitraums mit subnominalen Stromdichten betrieben wird, wobei die Betriebstemperatur in Abhängigkeit von den Stromdichten eingestellt wird.
- 55
13. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Erhöhung der Betriebstemperatur durch Verringern eines Kühlmittelflusses durch die und/oder Erhöhen einer Kühlmiteintrittstemperatur in die Elektrolysezellen erfolgt.
14. Anlage (100) zur Herstellung eines Wasserstoff enthaltenden Produkts (111), die zur Durchführung einer Elektrolyse (10) eingerichtet ist und für die Durchführung der Elektrolyse (10) einen oder mehrere, eine Vielzahl von Elektrolysezellen aufweisende Elektrolysestapel aufweist, wobei die Anlage (100) dafür eingerichtet ist, die Elektrolysezellen während eines kontinuierlichen oder eines diskontinuierlichen Produktionszeitraums zwischen einem ersten Zeitpunkt (BoL) und einem zweiten Zeitpunkt (EoL) mit einer an den Elektrolysestapel angelegten Elektrolysespannung zu beaufschlagen und die Elektrolysezellen während des Produktionszeitraums mit einer auf einen Vorgabewert eingestellten Betriebstemperatur zu betreiben, **dadurch gekennzeichnet, dass** Mittel bereitgestellt sind, die dafür eingerichtet sind, den Vorgabewert für die Betriebstemperatur während eines kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Teilzeitraums, der nach einem vorgegebenen Zeitpunkt während des Betriebszeitraums liegt, zu erhöhen.
15. Anlage (100) nach Anspruch 14, die zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 eingerichtet ist.

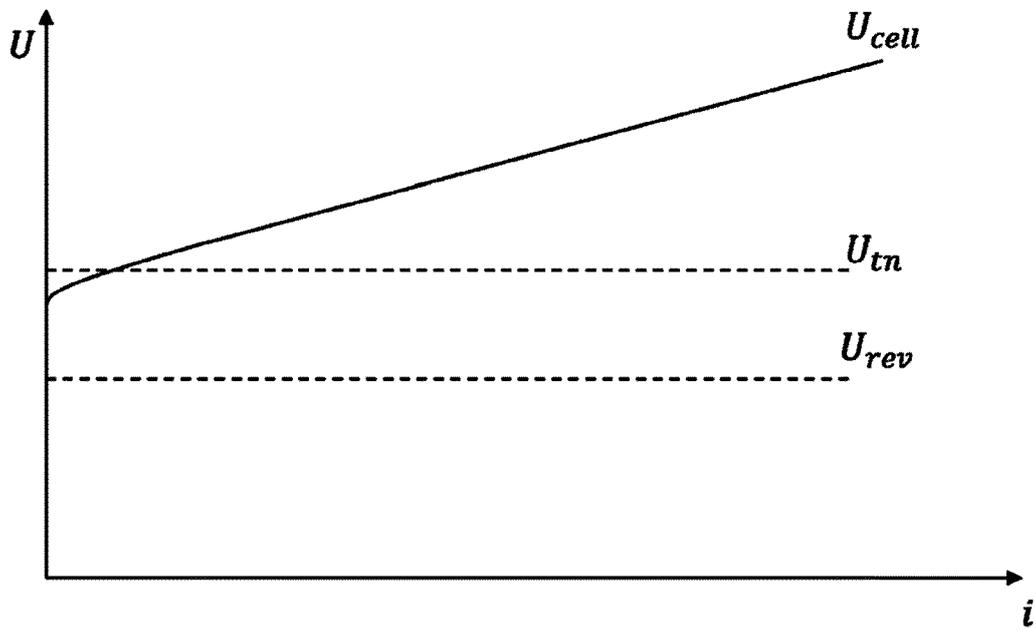


Fig. 1

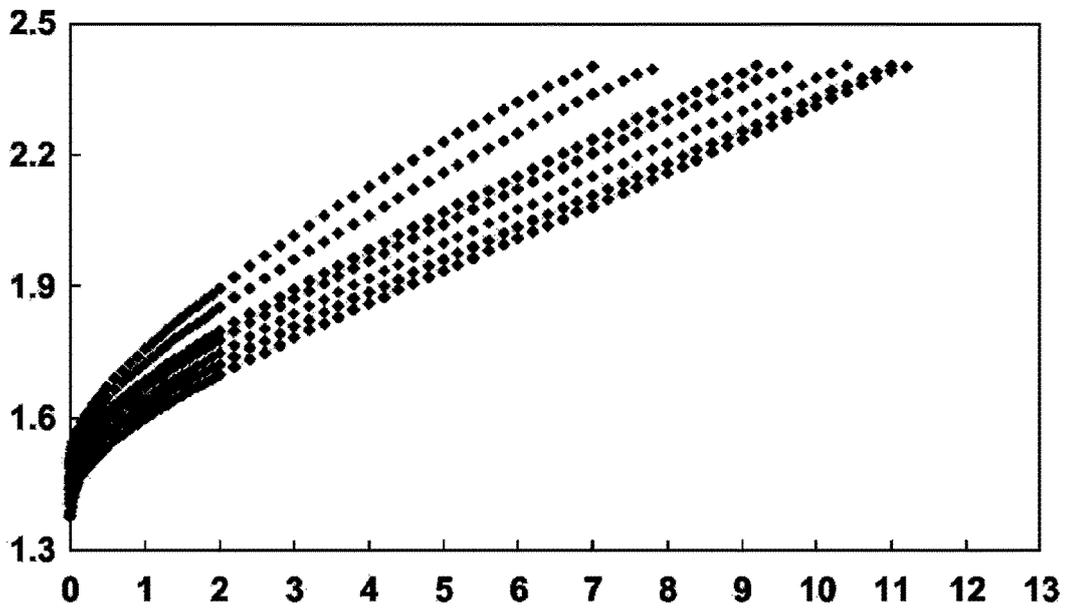


Fig. 2

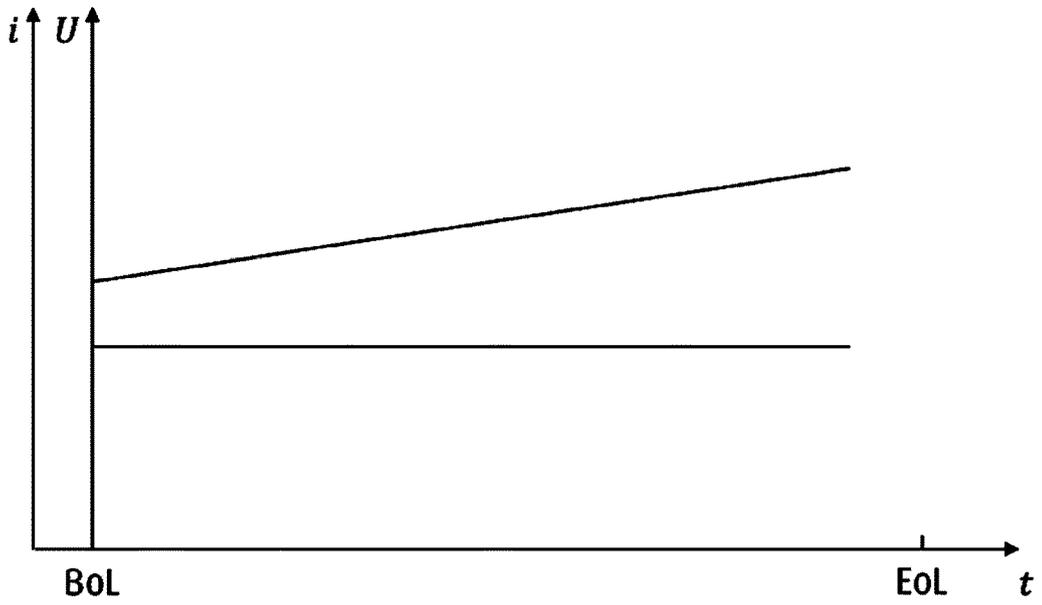


Fig. 3

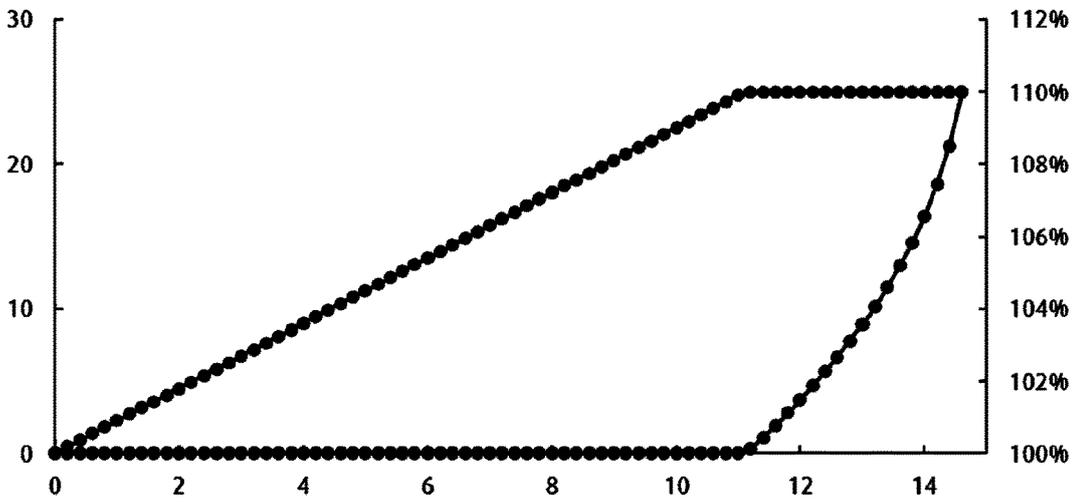


Fig. 4

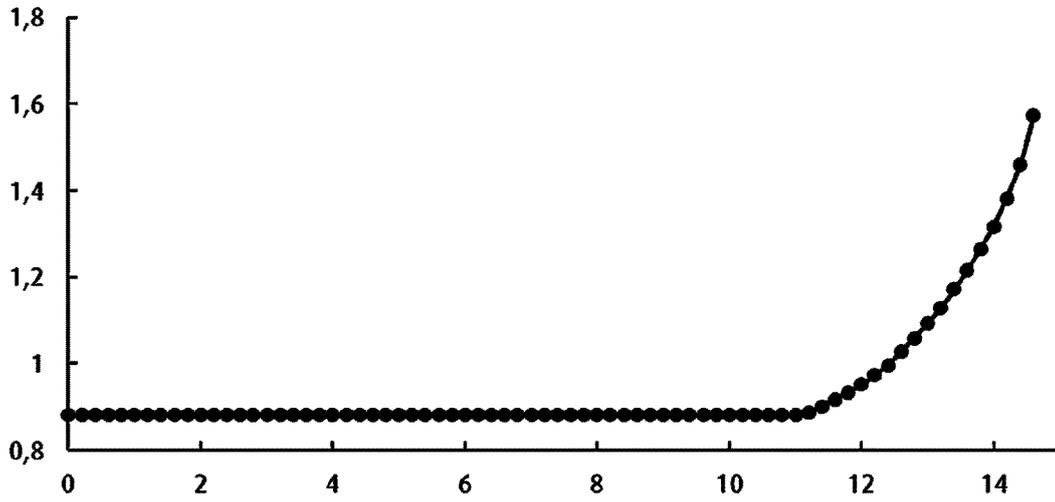


Fig. 5

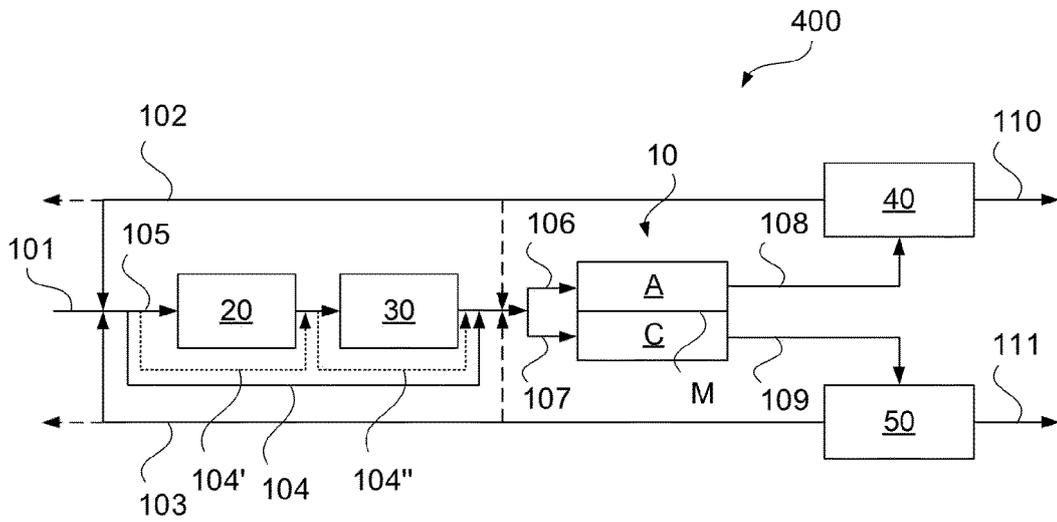


Fig. 6



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 22 02 0474

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	US 2005/197743 A1 (RUSTA-SALLEHY ALI [CA] ET AL) 8. September 2005 (2005-09-08) * das ganze Dokument *	1-15	INV. C25B1/02 C25B1/04 C25B9/19 C25B9/73 C25B15/021
X	US 11 041 246 B2 (HONDA MOTOR CO LTD [JP]) 22. Juni 2021 (2021-06-22) * das ganze Dokument *	1, 14, 15	
X	US 2021/071310 A1 (OTO TAKASHI [JP] ET AL) 11. März 2021 (2021-03-11) * das ganze Dokument *	14, 15	
A	CN 114 561 668 A (HYDROGEN ENERGY SCIENCE AND TECH DEVELOPMENT LIMITED COMPANY OF NATION) 31. Mai 2022 (2022-05-31) * das ganze Dokument *	14, 15	
A	JP 2022 139785 A (TOYOTA CENTRAL RES & DEV) 26. September 2022 (2022-09-26) * das ganze Dokument *	14, 15	
A		1-13	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			C25B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>München</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>21. August 2023</b>	Prüfer <b>Juhart, Matjaz</b>
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument ..... & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

1  
EPO FORM 1503 03.82 (F04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 22 02 0474

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.  
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

21-08-2023

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
15	<b>US 2005197743 A1</b>	<b>08-09-2005</b>	<b>US 2005183948 A1</b>	<b>25-08-2005</b>
<b>US 2005197743 A1</b>			<b>08-09-2005</b>	
<b>WO 2005028713 A1</b>			<b>31-03-2005</b>	
<b>WO 2005028714 A1</b>			<b>31-03-2005</b>	
<b>WO 2005028715 A1</b>			<b>31-03-2005</b>	
20	<b>US 11041246 B2</b>	<b>22-06-2021</b>	<b>CN 110528013 A</b>	<b>03-12-2019</b>
<b>JP 2019203174 A</b>			<b>28-11-2019</b>	
<b>US 2019360110 A1</b>			<b>28-11-2019</b>	
25	<b>US 2021071310 A1</b>	<b>11-03-2021</b>	<b>CN 112135928 A</b>	<b>25-12-2020</b>
<b>US 2021071310 A1</b>			<b>11-03-2021</b>	
<b>WO 2020208949 A1</b>			<b>15-10-2020</b>	
30	<b>CN 114561668 A</b>	<b>31-05-2022</b>	<b>KEINE</b>	
35	<b>JP 2022139785 A</b>	<b>26-09-2022</b>	<b>KEINE</b>	
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

## IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

### In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 3766831 A1 [0006]
- WO 2014154253 A1 [0007]
- WO 2013131778 A2 [0007]
- WO 2015014527 A1 [0007]
- EP 2940773 A1 [0007]

### In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- Hydrogen. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 15. Juni 2000 [0002]
- **HAUCH**. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis. *Science*, 2020, vol. 370 (6513 [0005]
- **EBBESEN**. Poisoning of Solid Oxide Electrolysis Cells by Impurities. *J. Electrochem. Soc.*, 2010, vol. 157 (10 [0005]