



(10) **DE 10 2012 201 052 A1** 2013.07.25

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2012 201 052.1**

(22) Anmeldetag: **25.01.2012**

(43) Offenlegungstag: **25.07.2013**

(51) Int Cl.: **B23H 9/10 (2012.01)**

B23H 3/04 (2013.01)

B23H 7/30 (2013.01)

(71) Anmelder:

MTU Aero Engines GmbH, 80995, München, DE

(72) Erfinder:

PLATZ, Albin, 86510, Ried-Baindlkirch, DE;

Arbinger, Daniela, 94551, Hunding, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 10 2011 082 795 A1

DE 21 11 982 A

DE 15 15 195 A

US 2010 / 0 051 476 A1

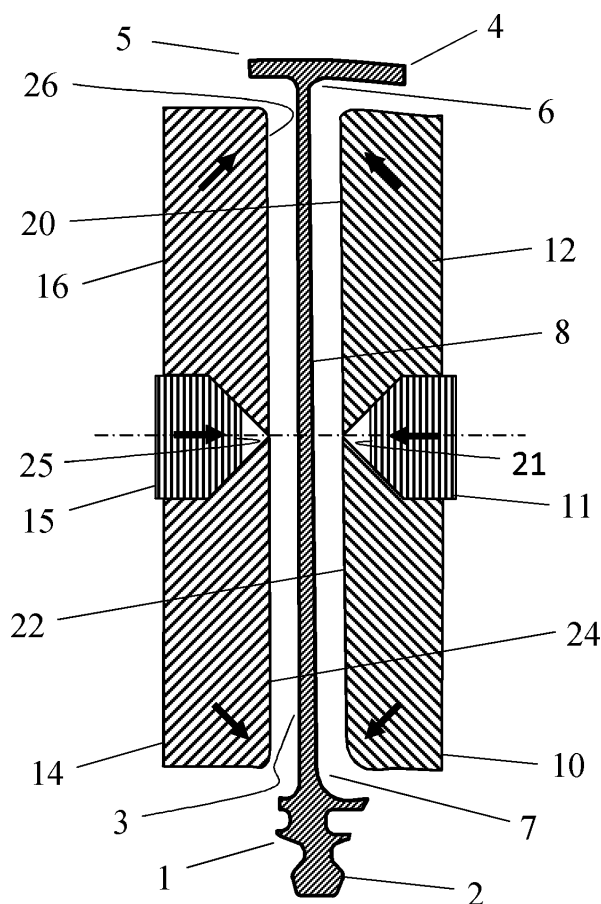
US 5 244 548 A

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Mehrteilige Elektrodenanordnung und Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung von
Schaufeln mit Deckbändern**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung von Schaufeln einer Strömungsmaschine mit mindestens einem U- oder trapezförmigen Querschnittsprofil der zu bearbeitenden Oberfläche, wobei eine Elektrodenanordnung mit mindestens drei Elektroden bereit gestellt wird, die in verschiedenen Richtungen verfahrbar sind, wobei die Elektroden aus einer Ausgangsposition mit einem ersten Abstand zur zu bearbeitenden Oberfläche in eine Endposition mit einem zweiten Abstand zur zu bearbeitenden Oberfläche verfahren werden, wobei in der Endposition eine geschlossene Arbeitsfläche der Elektroden mit einer Negativform der Oberflächenkontur der zu bearbeitenden Oberfläche dieser gegenüberliegt. Außerdem betrifft die Erfindung eine Elektrodenanordnung zur Durchführung einer elektrochemischen Bearbeitung, wobei die Elektrodenanordnung mindestens drei Elektroden umfasst, die in verschiedenen Richtungen zueinander und zu einer ortsfesten Lagerung verfahrbar sind, wobei die Elektroden aus einer Ausgangsposition in eine Endposition verfahrbar sind.



Beschreibung**HINTERGRUND DER ERFINDUNG****GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung von Schaufeln einer Strömungsmaschine, insbesondere eines Flugtriebwerks, sowie eine Elektrodenanordnung zur Durchführung einer elektrochemischen Bearbeitung.

STAND DER TECHNIK

[0002] Das elektrochemische Abtragen (electro-chemical machining ECM) ist zum Bearbeiten von elektrisch leitfähigen Bauteilen bekannt und wird im Bereich der Herstellung von Flugtriebwerken zur Bearbeitung der Triebwerksschaufeln eingesetzt.

[0003] Beispielsweise wird in der US 4,999,093 A eine Elektrodenanordnung für die elektrochemische Bearbeitung von Schaufeln beschrieben, bei der zwei Elektrodenteile zueinander bewegbar sind, um mit den Elektrodenteilen die Kontur der zu bearbeitenden Oberfläche abzubilden. Allerdings werden durch die Elektrodenteile Lücken in der Arbeitsfläche der Elektroden gegenüber der zu bearbeitenden Oberfläche erzeugt, bzw. ergeben sich durch die Elektrodenteile gegenseitige Beeinflussungen, die zu Unebenheiten in der zu bearbeitenden Oberfläche führen, so dass insgesamt die vorgeschlagene Lösung nicht zu gleichmäßig bearbeiteten Oberflächen führt und deshalb für die Bearbeitung von Triebwerksschaufeln ungeeignet ist.

[0004] Aus der WO 2006 137 525 A1 ist ebenfalls eine Elektrodenanordnung bekannt, bei der jeweils für eine zu bearbeitende Oberfläche zwei Elektroden vorgesehen sind, die zueinander beweglich sind, so dass auch schwierige Konturen mit der Elektrodenanordnung bearbeitbar sind. Allerdings sind die zueinander beweglichen Elektrodenteile so angeordnet, dass sie in einer bestimmten Reihenfolge verfahren werden müssen, sodass für einen erheblichen Bearbeitungszeitraum unterschiedlich Verhältnisse für die elektrochemische Bearbeitung vorliegen, was wiederum zu einem ungleichmäßigen Angriff an der zu bearbeitenden Oberfläche und Unregelmäßigkeiten in der bearbeiteten Oberfläche führt.

OFFENBARUNG DER ERFINDUNG**AUFGABE DER ERFINDUNG**

[0005] Es ist deshalb Aufgabe der vorliegenden Erfindung eine Elektrodenanordnung und eine entsprechende Verfahren zum Betrieb einer derartigen Elektrodenanordnung zur elektrochemischen Bearbeitung von Triebwerksschaufeln anzugeben, bei

welchem die Nachteile des Stands der Technik vermieden werden und insbesondere eine gleichmäßige Oberflächenbearbeitung zur Erzielung einer hohen Oberflächengüte möglich ist, wobei die zu bearbeitende Oberfläche komplexe Konturen und insbesondere Hinterschneidungen aufweisen können soll. Eine entsprechende Elektrodenanordnung soll darüber hinaus einfach herstellbar und betreibbar sein.

TECHNISCHE LÖSUNG

[0006] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 bzw. des Anspruchs 5 sowie eine Elektrodenanordnung mit den Merkmalen des Anspruchs 12. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0007] Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, dass mindestens zwei mehrteilige Elektroden oder mindestens drei Elektroden für die Bearbeitung einer Oberfläche vorgesehen werden, wobei die Elektrodenteile der mehrteiligen Elektrode oder die drei Elektroden in verschiedene Richtungen verfahrbar sind, und zwar insbesondere in Bezug zueinander und zu einer ortsfesten Lagerung. Die Verfahrbarkeit der Elektroden oder Elektrodenteile ermöglicht eine Bewegung der Elektroden oder Elektrodenteile von einer Anfangsposition mit einem ersten Abstand der Elektroden zur zu bearbeitenden Oberfläche hin zu einer Endposition mit einem zweiten Abstand der Elektroden bzw. deren Arbeitsflächen zur zu bearbeitenden Oberfläche, sodass ein gleichmäßiger elektrochemische Abtrag an der zu bearbeitenden Oberfläche möglich ist.

[0008] Bei der vorliegenden Erfindung wird sowohl von mehrteiligen Elektroden als auch von mehreren Elektroden gesprochen, wobei hier lediglich zum Ausdruck gebracht wird, dass mehrere Elektroden als eine Einheit (mehnteilige Elektrode) oder als separate Komponenten angesehen werden können, ohne dass sich ein technischer Unterschied zwischen Elektroden oder Elektrodenteilen ergeben muss, soweit die Elektroden oder Elektrodenteile ihre Funktion als Elektrode an sich erfüllen. Lediglich die konstruktive Anordnung der Elektrodenteile kann sich insofern von Elektroden unterscheiden, als Elektrodenteile mehr in Kombination miteinander angeordnet sein können, während Elektroden eher unabhängig voneinander vorgesehen sein können.

[0009] Die Bewegung der Elektroden kann dabei so geführt werden, dass sowohl in der Anfangsposition der Elektroden, als auch in der Endposition eine geschlossene Arbeitsfläche der Elektroden oder Elektrodenteile vorliegt, die im Wesentlichen komplementär zur Oberflächentopographie der zu bearbeitenden Oberfläche ist.

[0010] Die Bewegung der mehrteiligen Elektroden kann eine Hauptbewegungsrichtung aufweisen, die sich dadurch auszeichnen kann, dass alle Elektrodenteile einen einen Bewegungsanteil in dieser Richtung aufweisen, beispielsweise in Richtung des Schaufelblattes einer zu bearbeitenden Triebwerksschaukel. Insbesondere kann durch die Bewegung von mindestens drei Elektroden einer Elektrodenanordnung oder einer mehrteiligen Elektrode eine nahezu kontinuierliche und geschlossene Arbeitsfläche der Elektroden mit im Wesentlichen gleichen Abstand der Arbeitsfläche zu der zu bearbeitenden Oberfläche über die Bearbeitungszeit realisiert werden, sodass über die Bearbeitungszeit ein gleichmäßiger Abtrag über die gesamte zu bearbeitende Oberfläche eingestellt werden kann.

[0011] Durch die Gestaltung der Elektrodenanordnung mit mindestens drei verfahrbaren Elektroden bzw. einer mehrteiligen Elektrode mit mindestens drei verfahrbaren Elektrodenteilen zur Bearbeitung einer zu bearbeitenden Oberfläche kann auch gewährleistet werden, dass alle Elektroden im Wesentlichen gleichzeitig ihre Endposition erreichen, so dass unterschiedlich lange Bearbeitungszeiten ebenfalls vermieden werden und der Abstand der Elektroden oder Elektrodenteile zur Endkontur einer zu bearbeitenden Oberfläche im Wesentlichen gleich ist.

[0012] Damit können sowohl über die gesamte Bearbeitungszeit als auch über die gesamte zu bearbeitende Oberfläche gleichmäßige Abtragsbedingungen mit einem im Wesentlichen gleichen Abstand der Arbeitsfläche der Elektroden zu der zu bearbeitenden Oberfläche realisiert werden.

[0013] Hierbei kann das Längsschnittsprofil der zu bearbeitenden Oberfläche U- oder trapezförmig sein, wobei insbesondere die zu bearbeitende Oberfläche einen Teil eines Trapezes bilden kann und zwar den Teil mit der längeren Grundseite (Basis) und hierzu schräg verlaufenden Schenkeln, sodass eine Hinterschneidung gegeben ist. Eine derartige Längsschnittsform kann beispielsweise durch einen Längsschnitt einer Triebwerksschaukel mit einem Deckband, der Kontur des Schaufelblatts und einen Teil des Schaufelfußes, z.B. im Bereich einer Dichtfin, gegeben sein. Eine derartige komplizierte Oberflächenkontur kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren bzw. einer entsprechenden Elektrodenanordnung in einfacher Weise in einem Bearbeitungsschritt bearbeitet werden.

[0014] Die Elektrodenanordnung kann so ausgebildet sein, dass von den mindestens drei Elektroden oder Elektrodenteilen einer mehrteiligen Elektrode sich mindestens eine mittlere Elektrode oder ein mittleres Elektrodenteil entlang einer linearen Bewegungslinie, beispielsweise in Richtung des Schaufelblattes bewegt, während sich die äußeren Elektroden

oder Elektrodenteile, zwischen denen die mindestens eine mittlere Elektrode oder das mindestens eine Elektrodenteil angeordnet ist, von der Bewegungsrichtung der mindestens einen mittleren Elektrode oder dem mindestens einen Elektrodenteil schräg nach außen weg bewegen, und zwar in einem spitzen Winkel zwischen 30° und 60° zwischen den Bewegungslinien einerseits der mindestens einen mittleren Elektrode oder des mindestens einen Elektrodenteils und andererseits einer äußeren Elektrode.

[0015] Bei der Elektrodenanordnung können die äußeren Elektroden der mindestens drei Elektroden oder die äußeren Elektrodenteile einer mehrteiligen Elektrode in Bewegungsrichtung gesehen bezüglich ihrer Arbeitsflächen vor der mindestens einen mittleren Elektrode oder dem mindestens einen Elektrodenteil angeordnet sein, also zuerst gegenüber der zu bearbeitenden Oberfläche angeordnet sein, und insbesondere in der Anfangsposition die Arbeitsfläche der mindestens einen mittleren Elektrode oder des mindestens einen Elektrodenteils abdecken. Die mindestens eine mittlere Elektrode oder das mindestens eine Elektrodenteil kann entsprechend bei der Bewegung den äußeren Elektroden geringfügig nachlaufen.

[0016] Die Elektroden oder Elektrodenteile können zueinander isoliert ausgeführt sein und entsprechend mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen beaufschlagt werden. Insbesondere kann die mindestens eine mittlere Elektrode oder das mindestens eine mittlere Elektrodenteil gegenüber den äußeren Elektroden oder Elektrodenteilen isoliert sein und mit einer unterschiedlichen Spannung betrieben werden, um eventuell vorhandene geringfügige Unterschiede in der Spaltbreite zwischen den Arbeitsflächen der Elektroden und der zu bearbeitenden Oberfläche durch eine entsprechende Änderung der Potentialunterschiede bzw. der Spannungsverhältnisse auszugleichen.

[0017] Die Elektroden oder Elektrodenteile können sich auf linearen Bewegungspfaden bewegen. Darüber hinaus kann eine gleichmäßige Bewegung mit gleichbleibender Geschwindigkeit eingestellt werden.

[0018] Die Elektroden oder Elektrodenteile können auch miteinander gekoppelt sein, sodass ihre Bewegung aufeinander abgestimmt ist und ihre gegenseitige Bewegung durch die Kopplung zwangsweise gesteuert wird. Zusätzlich oder alternativ ist auch eine Steuerung durch eine geeignete Steuer- oder Regelungseinheit möglich.

[0019] Mehrere Elektroden, beispielsweise 4, 6 oder mehr Elektroden können sternförmig um einen Bearbeitungsplatz, insbesondere eine Triebwerksschaukel angeordnet sein, um verschiedene Seiten der zu bearbeitenden Triebwerksschaukel bearbeiten zu

können. Hierbei können mehrteilige Elektroden, insbesondere Elektroden mit drei Elektrodenteilen eingesetzt werden, wobei die Elektrodenteile in einer Ebene quer zur Ebene, in der die mehrteiligen Elektroden angeordnet sind, aufgereiht sein können. Damit lassen sich mehrere Seiten einer Triebwerksschaufel sowie die verschiedenen Bereiche der Triebwerksschaufel, die im Gaskanal dem Gasstrom ausgesetzt sind, also z.B. Schaufelblattbereich und Deckbandbereiche der verschiedenen Seiten der Triebwerksschaufel bearbeiten, auch wenn dort Hinterschnidungen vorhanden sind.

KURZBESCHREIBUNG DER FIGUREN

[0020] Die beigefügten Zeichnungen zeigen in rein schematischer Weise in

[0021] [Fig. 1](#) eine Längsschnittansicht für eine erfindungsgemäße Elektrodenanordnung vor dem Beginn einer elektrochemischen Bearbeitung einer Triebwerksschaufel,

[0022] [Fig. 2](#) eine Längsschnittansicht der Elektrodenanordnung aus [Fig. 1](#) am Ende der elektrochemischen Bearbeitung einer Triebwerksschaufel, und in

[0023] [Fig. 3](#) eine Querschnittansicht einer Elektrodenanordnung mit mehreren sternförmig angeordneten mehrteiligen Elektroden, wobei jede mehrteilige Elektrode durch eine Elektrodenanordnung gemäß [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) gebildet sein kann.

AUSFÜHRUNGSBEISPIEL

[0024] Weitere Vorteile, Kennzeichen und Merkmale der vorliegenden Erfindung werden bei der nachfolgenden detaillierten Beschreibung eines Ausführungsbeispiels anhand der beigefügten Zeichnungen deutlich. Allerdings ist die Erfindung nicht auf dieses Ausführungsbeispiel beschränkt.

[0025] Die [Fig. 1](#) zeigt eine erfindungsgemäße Elektrodenanordnung, die insgesamt sechs Elektroden **10**, **11**, **12**, **14**, **15**, **16** umfasst, die beidseitig einer zu bearbeitenden Turbinenschaufel **1** angeordnet sind. Alternativ könnten auch zwei Elektrodenanordnungen mit jeweils drei Elektroden vorgesehen werden. Somit ist es möglich, beide Seiten des Schaufelblatts **3** gleichzeitig zu bearbeiten. Es wäre jedoch auch vorstellbar, nur eine einseitige Bearbeitung der Turbinenschaufel **1** vorzunehmen, sodass in der Mindestkonfiguration die Elektrodenanordnung drei Elektroden umfassen könnte.

[0026] Die Elektroden sind in geeigneter Weise mit einer Spannungsquelle verbunden, die hier der Einfachheit halber nicht dargestellt ist. Üblicherweise sind die Elektroden **10**, **11**, **12**, **14**, **15**, **16** als Katho-

de gepolt, während die Turbinenschaufel **1** als Anode geschaltet ist.

[0027] Die Elektroden **10**, **11**, **12**, **14**, **15**, **16** können gegenseitig isoliert sein, um ein unterschiedliches elektrisches Potential anlegen zu können. Im gezeigten Ausführungsbeispiel der [Fig. 1](#) ist beispielsweise die Elektrode **11** gegenüber den benachbarten, außen liegenden Elektroden **10** und **12** isoliert und wird separat von einer Spannungsquelle mit Spannung beaufschlagt. In gleicher Weise ist bei der gegenüberliegenden Elektrodenanordnung die Elektrode **15** gegenüber den Elektroden **14** und **16** isoliert und mit einer unterschiedlichen Spannung beaufschlagt.

[0028] Die zu bearbeitende Turbinenschaufel **1** weist einen Schaufelfuß **2** auf, mit dem die Turbinenschaufel **1** in einer Turbinenscheibe angeordnet wird. Am gegenüberliegenden Ende sind am Schaufelblatt **3** zwei Deckbänder **4** und **5** angeordnet, die mit sogenannten Dichtfins im Bereich des Schaufelfußes **2** den Strömungsbereich für das Fluid der Strömungsmaschine definieren. Dadurch ergibt sich eine zu bearbeitende Oberfläche der Turbinenschaufel **1**, die sich beidseitig des Schaufelblatts **3** von den Deckbändern **4** und **5** über das Schaufelblatt **3** bis in den Fußbereich **2** erstreckt und im Schnitt eine U- bzw. trapezförmige Kontur aufweist. Bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel der [Fig. 1](#) liegt diese zu bearbeitende Oberfläche **8** auf den beiden Seiten des Schaufelblatts **3** vor, sodass jeweils drei Elektroden der Elektrodenanordnung eine entsprechende, im Schnitt U- bzw. trapezförmige Oberfläche **8** zugeordnet ist, die mittels der Elektroden **10**, **11**, **12**, **14**, **15**, **16** zu bearbeiten ist.

[0029] Durch die im Längsschnitt der Schaufel trapezförmige Gestalt, bei der die kürzere Grundseite offen ist und die längere Grundseite (Basis) durch das Schaufelblatt **3** gebildet wird, ergibt sich durch das schräg zum Schaufelblatt zur offenen Grundseite des Trapezes verlaufende Deckband **4** in Richtung einer Normalen auf das Schaufelblatt **3** eine Hinterschnidung **6**, die dazu führt, dass bei einer linearen Bewegung einer Elektrode in Richtung der Normalen des Schaufelblatts **3** der Abstand der Elektrode zum Deckband **4** im Bereich des Übergangs zum Schaufelblatt größer ist, als am Rand des Deckbands **4**. Bei einer elektrochemischen Bearbeitung kommt es jedoch neben der eingestellten Spannung im Wesentlichen auf den Abstand zwischen den Elektroden, d.h. Arbeitsfläche der Elektrode, und dem zu bearbeitenden Bauteil an, sodass im Bereich der Hinterschnidung **6** der Abtrag am Rande des Deckbands **4** größer wäre als im Bereich der Hinterschnidung.

[0030] Diesem Problem wird nunmehr mit der dreiteiligen Elektrodenanordnung beidseits des Schaufelblatts **3** abgeholfen, indem die Elektroden **10** und

12 bzw. **14** und **16** sich unter einem Winkel gegenüber der Bewegungsrichtung der Elektroden **11** bzw. **15** auf die zu bearbeitende Oberfläche **8** der Turbinenschaufel bei der Bearbeitung zu bewegen. Die **Fig. 1** zeigt die Ausgangsposition, bei welcher ein Spalt **7** mit einem ersten Abstand der zu bearbeitenden Oberfläche **8** der Triebwerksschaufel **1** zu den Arbeitsflächen **20**, **22**, **24** und **26** der Elektroden **10**, **12**, **14**, **16** eingestellt ist. Die Arbeitsflächen **20**, **22**, **24** und **26** der Elektroden **10**, **12**, **14**, **16** bilden hierbei eine komplementäre Oberfläche zur zu bearbeitenden Oberfläche **8**, sodass die Breite des Spalts **7** im Wesentlichen über der gesamten zu bearbeitenden Oberfläche **8** gleich ist. Die Arbeitsfläche **20** der Elektrode **12** ist hierbei insbesondere entsprechend komplementär zu der Hinterschneidung **6** über das Deckband **4** ausgebildet.

[0031] Die Arbeitsflächen **21** und **25** der Elektroden **11** und **15** sind in der in **Fig. 1** dargestellten Anfangsposition von den Arbeitsflächen **20**, **22** der Elektroden **12**, **10** bzw. den Arbeitsflächen **26**, **24** der Elektroden **16**, **14** verdeckt und stellen noch keinen Teil der Gesamtarbeitsfläche der Elektroden dar.

[0032] Allerdings ändert sich diese Situation, wenn die elektrochemische Bearbeitung der Turbinenschaufel **1** begonnen hat, und sich die Elektroden **10**, **11**, **12**, **14**, **15**, **16** mit kontinuierlicher Geschwindigkeit in Richtung der Triebwerksschaufel **1** bewegen. Hierbei bewegen sich die Elektroden **11**, **15** in genau entgegengesetzter Richtung aufeinander zu, und zwar quer zum Schaufelblatt, vorzugsweise entlang der Normalen der Schaufelblattoberfläche.

[0033] Dem gegenüber bewegen sich die jeweiligen äußeren Elektroden **10**, **12** bzw. **14**, **16** unter einem Winkel schräg zur Bewegungsrichtung der mittleren Elektroden **11**, **15** und zwar im einem Winkelbereich von 30° bis 60° , wobei in dem gezeigten Ausführungsbeispiel der Winkel ungefähr jeweils 45° beträgt, wenn unabhängig von der Bewegungsrichtung der spitze Winkel zwischen den Bewegungslinien der Elektroden **11**, **15** bzw. **12**, **10** und **14**, **16** genommen wird. Unter Berücksichtigung der Bewegungsrichtung und der Annahme, dass die Bewegungsrichtung der Elektrode **15** 0° ist und die Richtungsangabe entsprechend im Uhrzeigersinn gemacht wird, bewegt sich die Elektrode **14** ca. unter 45° , die Elektrode **10** bei 135° , die Elektrode **11** bei 180° , die Elektrode **12** bei 225° und die Elektrode **16** bei 315° .

[0034] Durch diese Art der Bewegung der Elektroden **10**, **11**, **12**, **14**, **15**, **16** wird erreicht, dass der Spalt **7** zwischen den Arbeitsflächen **20**, **21**, **22**, **24**, **25**, **26** der Elektroden **10**, **11**, **12**, **14**, **15**, **16** und der zu bearbeitenden Oberfläche **8** der Turbinenschaufel **1** gleichmäßig verringert wird, bis die in **Fig. 2** dargestellte Endposition erreicht wird. Die Lücke, die zwischen den Elektroden **10**, **12** bzw. **14**, **16** durch

die schräg nach außen verlaufende Bewegung entsteht, wird in gleicher Weise durch die jeweils mittleren Elektroden **11**, **15** ausgefüllt, sodass sich auch in der Endposition eine geschlossene Arbeitsfläche der Elektroden ergibt, die komplementär zu der zu bearbeitenden Oberfläche **8** der Schaufel **1** ist, wobei insbesondere im Wesentlichen der gleiche Abstand zwischen zu bearbeitender Oberfläche und der Arbeitsfläche der Elektroden vorliegt.

[0035] Da die Elektroden **11**, **15** der Bewegung der Elektroden **10**, **12**, **14**, **16** etwas nachlaufen, kann durch die isolierte Ausführung der Elektroden **11**, **15** gegenüber den Elektroden **10**, **12**, **14**, **16** und der separaten Spannungsversorgung ein unterschiedliches Potential an den Elektroden **11**, **15** eingestellt werden, sodass mögliche Unterschiede in der Ausbildung des Spalts **7** zwischen der zu bearbeitenden Oberfläche **8** und den Arbeitsflächen **20**, **21**, **22**, **24**, **25**, **26** durch die Potentialeinstellung ausgeglichen werden.

[0036] Durch die Ausbildung von Schrägflächen **30**, **31** an den benachbarten Elektroden, wie beispielsweise Elektroden **11** und **12**, also der mittleren Elektrode **11** und einer äußeren Elektrode **12**, kann eine Kopplung der Bewegungen der Elektrode **11** und der Elektrode **12** erreicht werden, die eine koordinierte Bewegung der mittleren Elektroden **11**, **15** und der äußeren Elektroden **10**, **12**, **14**, **16** ermöglicht. Neben der Ausbildung der hier gezeigten Schrägflächen **30**, **31** können auch andere geeignete Kopplungsmaßnahmen zur Kopplung der Bewegungen der Elektroden und insbesondere der mittleren Elektroden **11**, **15** mit den äußeren Elektroden **10**, **12**, **14**, **16** eingesetzt werden.

[0037] Die **Fig. 3** zeigt einen Querschnitt durch eine Triebwerksschaufel **1** und eine sternförmig zur Bearbeitung der Triebwerksschaufel um diese angeordnete Elektrodenanordnung. Die Elektrodenanordnung umfasst sechs Elektroden **55** bis **60**, von denen jede mehrteilig ausgebildet ist und zwar entsprechend der Ausführungsform, die in **Fig. 1** und **Fig. 2** gezeigt ist, so dass die dort dargestellten Elektroden Elektrodenanteile der mehrteiligen Elektroden **55** bis **60** bilden.

[0038] Die mehrteiligen Elektroden **55** bis **60** sind durch Dichtelemente **52** der Spülkammer voneinander getrennt. Die Doppelpfeile **51** zeigen die Hauptbewegungsrichtungen der Elektroden **55** bis **60**, wobei sich die jeweiligen äußeren Elektrodenanteile **10**, **12**, **14**, **16** schräg zur Zeichnungsebene bewegen, während die mittleren Elektrodenanteile **11** und **15** parallel zur Zeichnungsebene verschoben werden.

[0039] Durch die erfindungsgemäße Ausbildung der Elektrodenanordnung sowie dem entsprechenden Betrieb derartiger Elektrodenanordnungen in Bezug auf die Bearbeitung von Triebwerksschaufeln insbe-

sondere mit zwei Deckbändern, die Hinterschneidungen aufweisen, kann in einer einfachen Weise eine exakte Bearbeitung der Turbinenschaufel mit elektrochemischer Bearbeitung erfolgen, wobei sich eine hohe Qualität der bearbeiteten Oberfläche ergibt. Insbesondere im Bereich der Deckbänder **4, 5** bzw. der restlichen Arbeitsfläche der Elektroden **12, 16** ist eine hervorragende Bearbeitung möglich, die eine Nacharbeit überflüssig macht. Darüber hinaus kann der Startpunkt der Elektroden näher an der zu bearbeitenden Oberfläche gewählt werden, sodass die Strecke, die die Elektroden während der Bearbeitung verfahren werden müssen, verringert werden kann, was einen Vorteil hinsichtlich der Bearbeitungszeit ergibt.

[0040] Darüber hinaus lässt sich die Elektrodenanordnung einfach realisieren und mit anderen Maßnahmen zur Optimierung der Bearbeitungsergebnisse kombinieren, wie beispielsweise die Bearbeitung mit sternförmig angeordneten Elektroden zur Vermeidung eines Seitenspaltes, oder die Bearbeitung mit definiert reduzierten aktiven Senkflächen zur Verbesserung der Spaltverhältnisse über gekrümmte Schaufelblattbereiche.

[0041] Obwohl die vorliegende Erfindung anhand des Ausführungsbeispiels detailliert beschreiben worden ist, ist es für einen Fachmann selbstverständlich, dass die Erfindung nicht auf dieses Ausführungsbeispiel beschränkt ist, sondern dass vielmehr Abwandlungen in der Weise möglich sind, dass einzelne Merkmale weggelassen oder andersartige Kombinationen von Merkmalen vorgenommen werden. Die vorliegende Erfindung offenbart sämtliche Kombinationen der vorgestellten Einzelmerkmale.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 4999093 A [[0003](#)]
- WO 2006137525 A1 [[0004](#)]

Patentansprüche

1. Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung von Schaufeln einer Strömungsmaschine, wobei die Schaufel einen Gaskanalbereich aufweist und Deckbänder am Schaufelfuß und/oder an der Schaufelspitze umfasst, die einseitig oder beidseitig so geneigt sind, dass Hinterschneidungen im Gaskanalbereich vorliegen, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens zwei mehrteilige Elektroden (**10, 11, 12; 14, 15, 16**) verwendet werden, um von einer Ausgangsposition mit einem ersten Abstand von einer zu bearbeitenden Oberfläche in eine Endposition mit einem zweiten Abstand von einer Endkontur der zu bearbeitenden Oberfläche verfahren werden, so dass in der Endposition eine geschlossene Arbeitsfläche der Elektroden mit einer Negativform der Endkontur der zu bearbeitenden Oberfläche gegenüberliegt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass alle Elektrodenanteile (**10, 11, 12, 14, 15, 16**) gleichzeitig in der Endposition ankommen.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass jede mehrteilige Elektrode mindestens drei Elektrodenanteile (**10, 11, 12, 14, 15, 16**) umfasst, wobei außen liegende Elektrodenanteile (**10, 12; 14, 16**) in einem Winkel von 30° bis 60° zu einer Hauptbewegungsrichtung der Elektrode in Richtung der Deckbänder bewegt werden, während eine oder mehrere mittlere Elektroden die frei werdende Lücke im Bereich des Schaufelblattes schließen.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwei mehrteilige Elektroden (**10, 11, 12; 14, 15, 16**) verwendet werden, die um 180° versetzt und aufeinander zuweisend angeordnet sind und deren Hauptbewegungsrichtung auf einer Achse in Richtung des Schaufelblattes liegt oder dass drei, vier oder sechs oder mehr mehrteilige Elektroden verwendet werden, die in ihrer Hauptbewegungsrichtung sternförmig auf das Schaufelblatt zubewegt werden.

5. Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung von Schaufeln (**1**) einer Strömungsmaschine mit mindestens einem U- oder trapezförmigen Querschnittsprofil der zu bearbeitenden Oberfläche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Elektrodenanordnung mit mindestens drei Elektroden (**10, 11, 12, 14, 15, 16**) bereit gestellt wird, die in verschiedenen Richtungen verfahrbar sind, wobei die Elektroden aus einer Ausgangsposition mit einem ersten Abstand zur zu bearbeitenden Oberfläche (**8**) in eine Endposition mit einem zweiten Abstand zur zu bearbeitenden Oberfläche verfahren werden, so dass in der Endposition eine geschlossene Arbeitsfläche der Elektroden mit einer Negativform der Oberflächenkontur der zu bearbeitenden Oberfläche dieser gegenüberliegt.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden (**10, 11, 12, 14, 15, 16**) jeweils eine Arbeitsflächenkontur aufweisen, die einem Teil der zu bearbeitenden Oberfläche komplementär ist und/oder dass das U- oder trapezförmigen Querschnittsprofil der zu bearbeitenden Oberfläche durch ein Deckband, das Schaufelblatt und einen Teil im Bereich des Schaufelfußes gebildet ist, und dass insbesondere zumindest ein Teil des Deckbandes (**4**) so zum Schaufelblatt (**3**) orientiert ist, dass eine Hinterschneidung in Bezug auf eine Richtung parallel zur Oberflächennormale auf das Schaufelblatt ausgebildet ist.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Bewegungsrichtungen der Elektroden so eingerichtet sind, dass sich mindestens eine mittlere Elektrode (**11, 15**) der mindestens drei Elektroden (**10, 11, 12, 14, 15, 16**), die sich zwischen zwei äußeren Elektroden (**10, 12, 14, 16**) befindet, linear auf das Schaufelblatt zu bewegt, während sich die beiden äußeren Elektroden in einem Winkel von 30° bis 60° zur Bewegungsrichtung der mittleren Elektrode von der mittleren Elektrode weg bewegen.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Elektroden oder Elektrodenanteile während der Bewegung von der Ausgangsposition in die Endposition mit ihren Arbeitsflächen unterschiedlich zur zu bearbeitenden Oberfläche beabstandet sind, so dass mindestens eine Elektrode oder ein Elektrodenanteil gegenüber den anderen Elektroden oder Elektrodenanteilen vor- und nachläuft, wobei die nachlaufenden Elektrodenanteile oder Elektroden gegenüber den vorauslaufenden Elektrodenanteilen der mehrteiligen Elektrode oder Elektroden elektrisch isoliert sind und mit einer höheren Spannung versorgt werden.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass alle Elektrodenanteile oder Elektroden in Endposition im Wesentlichen den gleichen Abstand von einer Endkontur der zu bearbeitenden Oberfläche aufweisen.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden oder Elektrodenanteile, insbesondere eine mittlere Elektrode oder ein mittleres Elektrodenanteil (**11, 15**) gegenüber außen liegenden Elektroden oder Elektrodenanteilen (**10, 12, 14, 16**) isoliert sind und/oder mit unterschiedlicher Spannung beaufschlagt werden.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens eine mittlere Elektrode oder ein mittleres Elektrodenanteil (**11, 15**) so mit Spannung beaufschlagt wird, dass der effektive elektrochemische Abstand dem Abstand der äußeren Elek-

troden oder Elektrodenanteilen (**10, 12, 14, 16**) zur zu bearbeitenden Oberfläche entspricht.

12. Elektrodenanordnung zur Durchführung einer elektrochemischen Bearbeitung, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektrodenanordnung mindestens drei Elektroden (**10, 11, 12, 14, 15, 16**) oder mindestens zwei mehrteilige Elektroden umfasst, wobei die Elektroden und/oder die Elektrodenanteile der mehrteiligen Elektrode in verschiedenen Richtungen zueinander und zu einer ortsfesten Lagerung verfahrbar sind, wobei die Elektroden und/oder Elektrodenanteile aus einer Ausgangsposition in eine Endposition verfahrbar sind.

13. Elektrodenanordnung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden linear und/oder mit gleichmäßiger Geschwindigkeit verfahrbar sind.

14. Elektrodenanordnung nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektrodenanordnung mindestens zwei mehrteilige Elektroden (**10, 11, 12, 14, 15, 16**) umfasst, die um 180° versetzt und einander zugewandt gegenüberliegend angeordnet sind, oder dass drei, vier oder sechs oder mehr mehrteilige Elektroden sternförmig angeordnet sind.

15. Elektrodenanordnung nach einem der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass von den mindestens drei Elektroden die außen angeordneten Elektroden (**10, 12, 14, 16**) oder von der mehrteiligen Elektrode ein außen angeordnetes Elektrodenenteil in der Bewegungsrichtung bezüglich ihrer Arbeitsflächen vor der mindestens einen mittleren Elektrode oder einem mittleren Elektrodenenteil (**11, 15**) angeordnet sind und die mittlere Elektrode oder das mittlere Elektrodenenteilmachläuft und/oder die Elektroden oder Elektrodenanteile zumindest teilweise gekoppelt sind.

16. Elektrodenanordnung nach einem der Ansprüche 12 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektroden oder Elektrodenanteile mit ihren Arbeitsflächen (**20, 21, 22, 24, 25, 26**) in der Endposition eine kontinuierliche Oberfläche bilden und/oder die Elektroden oder Elektrodenanteile gegenseitig, insbesondere eine mittlere Elektrode oder ein mittleres Elektrodenenteil gegenüber außen liegenden Elektroden oder Elektrodenanteilen, isoliert sind und/oder mit unterschiedlicher Spannung beaufschlagbar sind.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

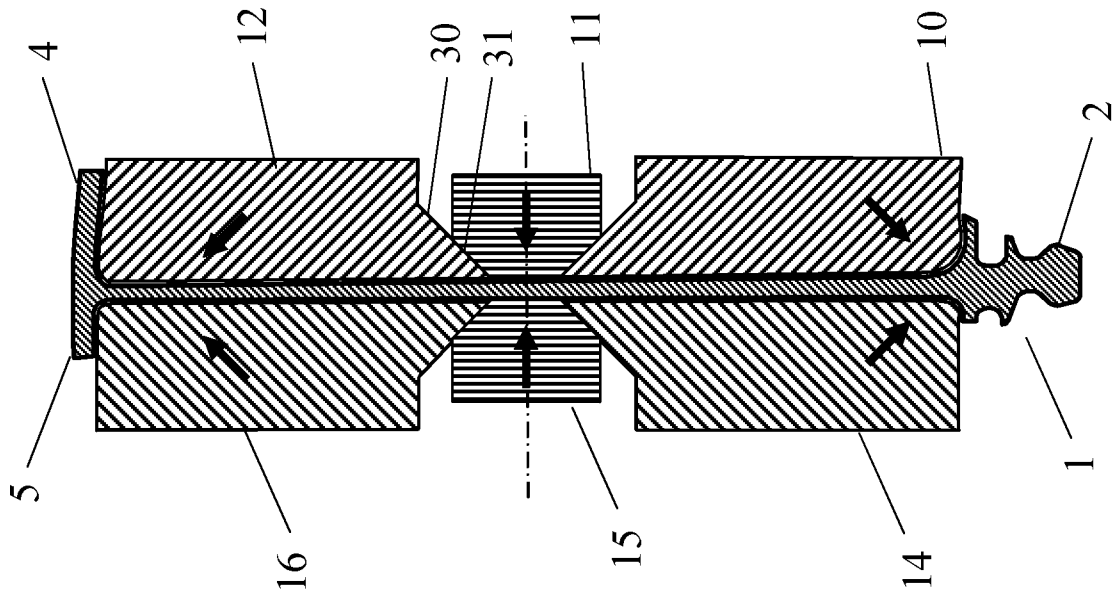


Fig. 2

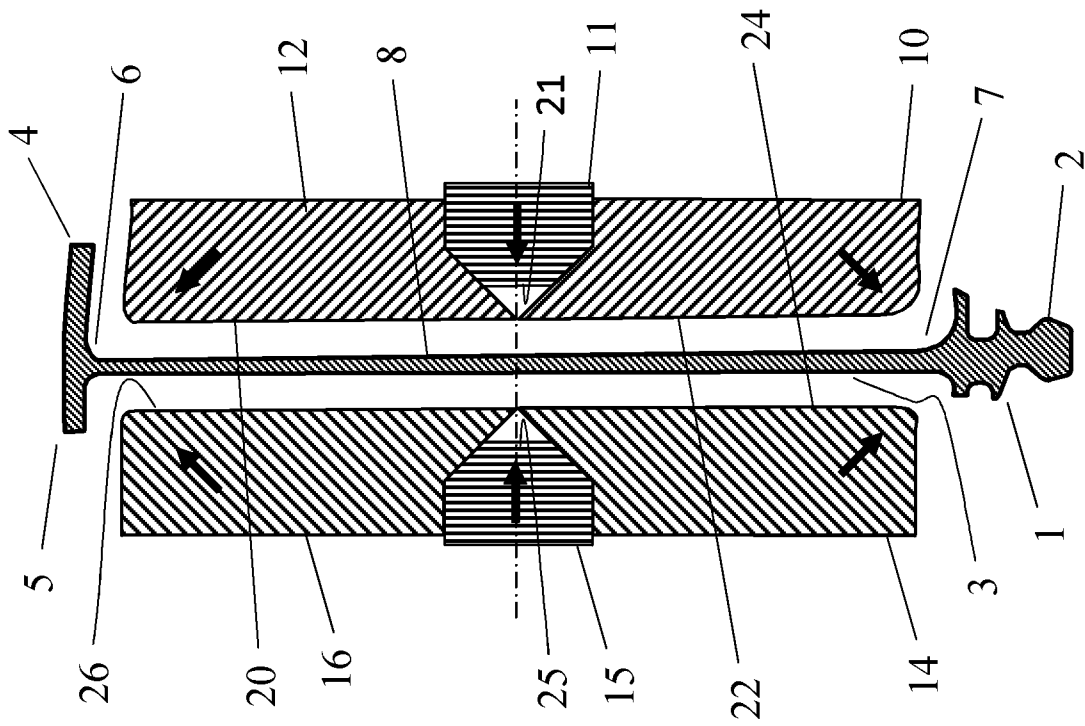


Fig. 1

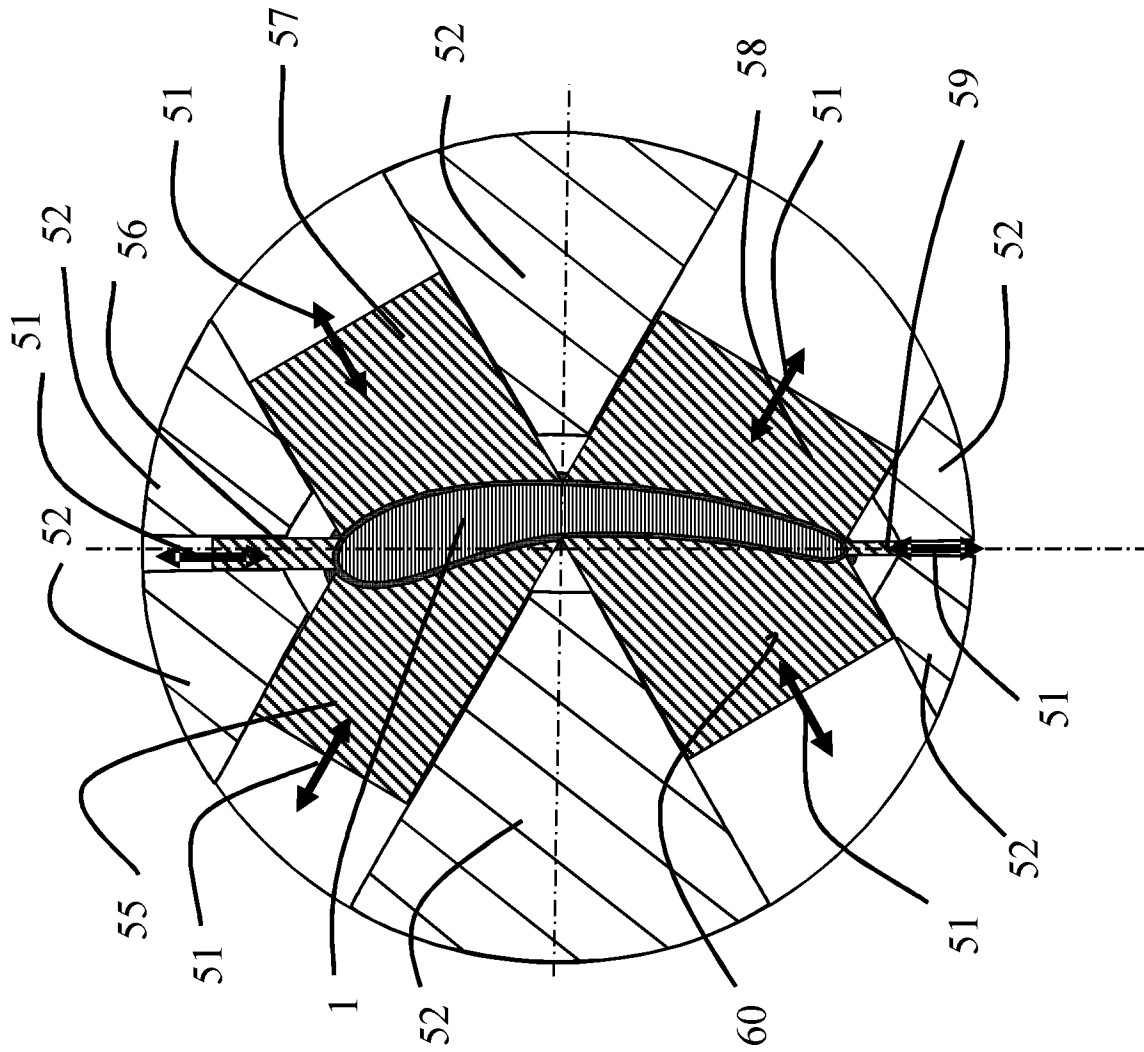


Fig. 3