

Wellenpumpe mit nichtlinearem Luftspeicher

Ziel dieser Erfindung ist das Pumpen von Wasser mit Kraft der Meereswellen.

Nächstliegender Stand der Technik ist DE102009041509. Die dort vorgeschlagene Wellenpumpe funktioniert nach dem bekannten Prinzip der schwingenden Wassersäule (Oscillating Water Column, OWC). Sie nutzt den wechselnden Luftdruck aus einer Wellenkammer (1), um damit Wasser über eine Kaskade von besonders geformten Gefäßen, die Pumpkaskade (2), nach oben zu befördern. Die Wellenpumpe hat keine beweglichen Teile und lässt sich kostengünstig aus Beton herstellen.

Bei Versuchen an bisherigen Wellenpumpen findet man, dass ein zu hoher Druckunterschied an der Pumpkaskade (2), wie er bei großen Wellen leicht auftreten kann, deren Gefäße (7) zum Überlaufen bringt, oder sogar leer bläst. Dann ist die mühsam gewonnene, potenzielle Energie des hochgepumpten Wassers verloren. Beim Leerblasen wird außerdem die Wellenpumpe funktionsunfähig.

Eine naheliegende, aber ineffiziente Lösung wären Ventile, die sich bei zu hohem Druckunterschied öffneten und einen Druckausgleich ermöglichten. Dabei ginge zwar Energie verloren, doch wären diese Verluste geringer als die beim Überlaufen. Ein Druckausgleich könnte aber den mittleren Wasserstand in der Wellenkammer ändern, diesen möglicherweise in einen ungünstigen Bereich verschieben. Als Ventile kämen etwa Klappen oder Deckel in Frage, die durch Federkraft oder Gewichte auf geeignete Schwellendrücke eingestellt wären. Oder auch sensorgesteuerte Ventile.

Eine andere naheliegende, aber schlechte Lösung wäre, die Ränder der Pumpgefäße (7) sehr viel höher zu machen, so dass auch bei allerhöchsten Druckunterschieden kein Wasser überlaufen würde. Auch das Fassungsvermögen der Pumpgefäße könnte man entsprechend vergrößern. Der Aufwand an Material und Platz wäre unverhältnismäßig größer, und das Pumpwasser müsste unter Reibungsverlusten längere Wege durchfließen.

Schließlich könnte man noch die Wellenkammer (1) oder deren Eintrittsöffnung verkleinern, dann würde sie weniger Wellenenergie aufnehmen, und auch alle Druckunterschiede wären kleiner. Oder man könnte bei vorgegebener Wellenkammer die Pumpkaskade (2) vergrößern, der Effekt wäre derselbe. Um ein Überlaufen der Pumpkaskade zu vermeiden, müsste man also laufend alle Komponenten aufeinander abstimmen, und auch an die momentane Wellensituation. Komplizierte Regelungstechnik würde aber nicht gut zum Konzept der Wellenpumpe passen, deren Hauptvorteil ihre Einfachheit ist.

Selbst bei bester Abstimmung aller Komponenten bliebe noch ein weiteres Problem, nämlich dass der von der Wellenkammer (1) gelieferte Luftdruck in seinem Zeitverlauf nur wenig zum Antrieb der Pumpkaskade (2) geeignet ist, denn er verbringt relativ wenig Zeit in den Arbeitsbereichen der Pumpkaskade, dafür aber viel Zeit in den Übergängen dazwischen. Während der Luftdruck, vereinfacht, einer Sinusschwingung folgt, bräuchte man zum Wasserpumpen eher eine Rechteckschwingung.

Die vorliegende Erfindung vermeidet die genannten Nachteile des Standes der Technik und bildet letzteren in vorteilhafter Weise weiter.

Die neue Wellenpumpe bekommt einen Luftspeicher (3, 4) mit nichtlinearer Druck-Volumen-Kennlinie. Der Luftspeicher kann Luft aus der Wellenkammer (1) aufnehmen und auch wieder an

diese abgeben. Sowohl die Luft als auch die damit verbundene Energie bleiben der Wellenpumpe erhalten.

In Phasen hohen Drucks wird Luft eingelagert und so der Pumpkaskade (2) entzogen, Druckspitzen werden abgemildert. Beim darauf folgenden Rückgang des Drucks wird Luft zurückgegeben, der Rückgang dadurch verlangsamt, der Druck bleibt länger im Arbeitsbereich der Pumpkaskade. Die Nichtlinearität des Luftspeichers verhindert die Luftaufnahme bei niedrigem Druck, verkürzt so die Übergangszeiten, in denen die Pumpe ruht. Entsprechendes gilt für positive wie negative Druckrichtung. Der Druck wird in seinem Zeitverlauf in Richtung einer Rechteckschwingung verzerrt.

Figur 7 zeigt unten beispielhaft die Druck-Volumen-Kennlinie eines erfindungsgemäßen Luftspeichers. Je nach aufgenommenem oder abgegebenem Luftvolumen V stellt sich an diesem, und auch an einer parallel geschalteten Pumpkaskade, ein gewisser Druck p ein, der hier als Unterschied zum Umgebungsdruck aufgetragen ist. Nahe des Umgebungsdrucks verläuft die Kennlinie möglichst steil, an den Rändern des gewünschten Druckbereichs möglichst flach. Idealerweise sollten sich die flachen Bereiche je einem Sättigungsdruck nähern, der niemals über- oder unterschritten werden kann, was aber in der Praxis kaum zu bewerkstelligen wäre. Jedenfalls nicht bei begrenztem Platz. Die hier gezeigte Kennlinie genügt aber ihrem Zweck.

Die Wellenkammer liefert einen veränderlichen Luftstrom, der ungefähr dem Verlauf der eingefangenen Meereswelle folgt. Entsprechend der nichtlinearen Druck-Volumen-Kennlinie des Luftspeichers - sowie auch weiterer angeschlossener Komponenten, die in dieser Betrachtung vernachlässigt seien - baut sich im Inneren der Wellenkammer ein veränderlicher Luftdruck auf, der gegenüber der Meereswelle verzerrt ist. Figur 8 zeigt den verzerrten Druckverlauf als Antwort auf

verschieden große, sinusförmige Meereswellen, berechnet mit der Kennlinie aus Figur 7. Die hier zugrunde liegenden Volumenschwingungen nehmen in gleich großen Schritten zu, doch die sich daraus ergebenden Druckschwingungen werden einander immer ähnlicher. Während der Druck für kleine Wellen weitgehend sinusförmig bleibt, wird er bei großen Wellen zunehmend zur Rechteckschwingung.

Es sei angemerkt, dass auch andere Teile der Wellenpumpe nichtlineare Kennlinien haben können, insbesondere die Pumpkaskade, aber auch die Wellenkammer, wenn deren Wände nicht parallel sind. Die Eigenschaften solcher Teile sollte man beim Entwurf des Luftspeichers berücksichtigen.

Ein erfindungsgemäßer, nichtlinearer Luftspeicher kann auf vielerlei Weise gebaut werden. In einer bevorzugten Bauart basiert er auf einem teils mit Luft, teils mit Wasser gefüllten U-Rohr, auch als Wasserpendel bekannt, wobei die Schwingfähigkeit eines solchen zunächst unbeachtet bleibe.

Leitet man ein gegebenes Luftvolumen V in die eine Öffnung des U-Rohrs, dann verschiebt sich die Wassersäule entsprechend dem Rohrquerschnitt und baut einen Gegendruck p auf. Gleichzeitig verlässt ein gleiches Luftvolumen V das U-Rohr durch die andere Öffnung, wobei die Zusammendrückbarkeit der Luft hier vernachlässigt sei. Das Einleiten von Luft gegen p erfordert Energie, die als potenzielle Energie der Wassersäule gespeichert bleibt, bis die Luft das U-Rohr wieder verlässt.

Bei überall gleichem Rohrquerschnitt wäre der Zusammenhang zwischen p und V linear. Erfindungsgemäß ändert sich aber der Querschnitt des U-Rohrs entlang des Weges der Wassersäule, genauer, entlang der Wege der zwei Wasserspiegel, und zwar gerade so, dass sich die jeweils gewünschte, nichtlineare Kennlinie ergibt.

Figur 4 zeigt zwei U-Rohre mit plötzlicher Änderung des Querschnitts auf der Höhe s , jeweils darunter sind die zugehörigen Kennlinien. Beim linken U-Rohr verengt sich der Querschnitt plötzlich, beim rechten erweitert er sich. Beide Kennlinien sind jeweils bei $-V_s$ und V_s geknickt, und somit nichtlinear.

Den linken Luftspeicher kann man als „Volumenbegrenzer“ (4) bezeichnen, weil dessen Volumen jenseits des Knicks kaum weiter ansteigt. Den rechten kann man entsprechend als „Druckbegrenzer“ (3) bezeichnen, weil bei ihm der Druck jenseits des Knicks kaum weiter ansteigt.

Mit beiden Luftspeicher-Varianten kann man die Wellenpumpe verbessern, doch man müsste sie unterschiedlich schalten. Um die gewünschte Druckverzerrung zu erreichen, würde man den Volumenbegrenzer (4) in Reihe, den Druckbegrenzer (3) parallel zur Pumpkaskade (2) einbauen.

Da plötzliche Querschnittsänderungen strömungsungünstig sind und hohe Leistungsverluste zur Folge hätten, baut man Volumen- wie Druckbegrenzer besser mit weichen Übergängen, und mit entsprechend weicheren Kennlinien, so wie in Figur 5.

Figur 6 zeigt weitere Bauweisen von Volumen- und Druckbegrenzer, wobei jeweils eine Hälfte des U-Rohrs von einem großen Behälter oder Gewässer gebildet wird, dessen Wasserspiegel sich beim Speichervorgang nicht merklich ändert.

Zu dieser Bauart gehört auch der Druckbegrenzer in Figur 7. Er kann ab einem gewissen Druck p_{\max} Luft hindurch lassen und zum Überdruckventil werden, so wie in Figur 9 dargestellt. Wegen der schon genannten Energieverluste sollte dieser Fall aber nur selten eintreten. Auch, weil durchperlende Luft immer Wasser verspritzt und aus dem Luftspeicher hinaus trägt.

Luftspeicher können durch Verschaltung von Luftspeichern aufgebaut sein, und die Verschaltung kann eine andersartige Kennlinie haben als jeder einzelne Luftspeicher. Figur 10 zeigt einen Druckbegrenzer aus zwei einzelnen Luftspeichern, von denen der linke nur die negative, der rechte nur die positive Halbwelle begrenzt. Die Kombination „komplementärer“ Luftspeicher kann, wie hier, von Vorteil sein: Die Engstelle im Querschnitt wird so überwiegend von Luft durchströmt statt von Wasser, was den Strömungswiderstand deutlich verringert gegenüber einem entsprechenden einzelnen Luftspeicher, bei dem gleich viel Wasser wie Luft die Engstelle passieren müsste.

Volumenbegrenzer (4) und Druckbegrenzer (3) sind theoretisch, nicht aber praktisch austauschbar. Sie unterscheiden sich vor allem im Strömungswiderstand. Nahe dem Ruhepegel, wo Luft und Wasser besonders schnell strömen, ist der Druckbegrenzer besonders eng, der Volumenbegrenzer besonders weit. So hat der Druckbegrenzer einen relativ großen Strömungswiderstand, der Volumenbegrenzer einen relativ kleinen. Auch enthält der Volumenbegrenzer viel mehr Wasser als der Druckbegrenzer, ist somit träger und langsamer.

Das hat wiederum großen Einfluss auf die Schwingfähigkeit dieser Luftspeicher, die ja im Grunde Wasserpumpen sind. Der Volumenbegrenzer ist schwach gedämpft, lässt sich leicht in Schwingung versetzen und kann bei niedriger Eigenfrequenz lange nachschwingen. Der Druckbegrenzer hingegen ist stark gedämpft und schwingt bei hoher Eigenfrequenz eher wenig.

Wegen seiner großen Masse und der geringen Dämpfung kann vor allem der Volumenbegrenzer viel Schwingungsenergie aufnehmen und über mehrere Wellenperioden speichern. In der Wellenpumpe wirkt er dann wie ein Schwungrad, das die Unregelmäßigkeiten der Meereswellen auszugleichen sucht.

Der Volumenbegrenzer (4) muss groß sein, denn wegen seiner Reihenschaltung mit der Pumpkaskade (2) fließt der gesamte Luftstrom zu dieser durch ihn hindurch und darf nicht behindert werden. Hingegen kann der parallel geschaltete Druckbegrenzer (3) durchaus klein sein. Er wirkt wie ein Frequenzfilter und leitet im Bereich seiner Eigenfrequenz Druckwellen aus der Wellenkammer (1) hinaus, und auch die darin enthaltene Kraft, weswegen diese Eigenfrequenz möglichst weit oberhalb der Meereswellenfrequenz liegen sollte.

Die Wellenkammer (1) kann durch Querschnittsverengung am oberen Ende in einen Volumenbegrenzer (4) verwandelt werden, denn sie ist auch ein Wasserpendel. Allerdings kann sie nur positive Halbwellen begrenzen, denn eine Verengung am unteren Ende würde die Einlassöffnung zu sehr verkleinern und die Welle bliebe draußen. Für negative Halbwellen könnte man ersatzweise einen einseitig wirkenden Druckbegrenzer (3) vorsehen, etwa direkt hinter der Wellenkammer, so wie das in Figur 1 verwirklicht ist.

Figuren 1 und 2 zeigen die auf dem Wasserpendel beruhenden Druckbegrenzer (3) und Volumenbegrenzer (4) in Schnitten durch Wellenpumpen. Die Betonstrukturen stehen verschiebbar auf schiefen ebenen Platten am Ufergrund (6), vielleicht auf Gleitschienen, damit man sie dem wechselnden Wasserstand des Meeres (5) nachführen kann.

Einen nichtlinearen Luftspeicher kann man auch nach anderen Prinzipien verwirklichen. Allgemein braucht es dazu einen Luftbehälter mit veränderlichem Volumen, zum Beispiel einen Zylinder mit Kolben, eine asymmetrische Dreh- oder Schwingtür, einen Balg, eine Membran, einen Ballon, und es braucht eine Rückstellkraft, die das veränderliche Volumen auf einen oder mehrere Ruhewerte zu stellen versucht, zum Beispiel eine

Feder, ein Gewicht, ein Magnet, vielleicht unter Vermittlung einer ausgeklügelten Mechanik.

Figur 11 zeigt einen nichtlinearen Luftspeicher mit asymmetrischer Schwingtür (10) und Rückstellmechanik (11), darunter die zugehörige Kennlinie. Die Schwingtür stößt, bis auf einen winzigen Dichtspalt, an die passend gestalteten Wände und lässt fast keine Luft vorbei. Leitet man ein Luftvolumen V in den Luftspeicher, wird die Schwingtür gegen die Kraft der Rückstellmechanik ausgelenkt und es baut sich ein Gegendruck p auf.

Die dargestellte Kennlinie ist eine von vielen möglichen bei dieser Bauart. Sie ist hier die eines Volumenbegrenzers mit zwei stabilen Ruhelagen, wie er als Wasserpfeifenkaum zu verwirklichen wäre. Die Ruhelagen entsprechen dem positiven und dem negativen Arbeitsbereich der Pumpkaskade. Die kleinen Pfeile deuten an, wohin das Luftspeichervolumen von der betreffenden Stelle aus strebt, nämlich zu den zwei äußeren Nullstellen. Ein solches Verhalten, auch bekannt als Kippverhalten, bewirkt einen besonders schnellen Übergang zwischen den Arbeitsbereichen der Pumpkaskade, ist somit besonders gut geeignet für eine Rechteckverzerrung des Drucks.

Die Rückstellmechanik hat eine stabförmige Feder, die sowohl auf Zug als auch auf Druck belastbar ist, mit vielleicht linearem Kraft-Längen-Zusammenhang. Sie verbindet über zwei Gelenke und einen Hebel die Schwingtür mit der Wand. In jeder der zwei Ruhelagen ist die Feder entspannt. Um von der einen in die andere Ruhelage zu kommen, muss man die Feder zusammendrücken, in der entgegengesetzten Richtung muss man sie dehnen. So entsteht die gezeigte nichtlineare Kennlinie.

Liegt die Achse der Schwingtür horizontal, resultiert ein Teil der Rückstellkraft auch aus dem Schwingtürgewicht. Eine pendelnde Schwingtür kann ebenfalls Schwingungsenergie

speichern und damit Unregelmäßigkeiten der Meereswellen ausgleichen. Mit verschiebbaren Gewichten auf der Schwingtür könnte man ihre Eigenfrequenz laufend an die Meereswellen anpassen. Eine andere Möglichkeit wäre eine Bremsvorrichtung, die die Schwingtür am Umkehrpunkt ihrer Bewegung anhält und im richtigen Moment wieder frei gibt, dadurch ginge keine Schwingungsenergie verloren. Entsprechendes könnte man natürlich auch für andere Bauarten entwickeln.

Figur 3 zeigt einen derartigen bistabilen Volumenbegrenzer (4) mit Schwingtür (10) und Rückstellmechanik (11) im Schnitt durch eine Wellenpumpe.

Einen anderen bistabilen Volumenbegrenzer kann man mit zwei Gummiballons (12) aufbauen. Figur 12 zeigt das. Der eine Gummiballon ist innerhalb, der andere ist außerhalb des Luftspeichers. Die Gummiballons sind an der Wand befestigt und über ein kurzes Rohr verbunden. Sie umschließen gemeinsam eine separate Menge Gas, die gegenüber der Umgebungsatmosphäre einen gewissen Überdruck aufweisen kann.

Von Luftballons kennt man, dass das Aufblasen am Anfang sehr viel, mit zunehmender Größe immer weniger Kraft erfordert: Die Rückstellkraft des Gummiballons ist nichtlinear. Wenn zwei gleiche Gummiballons wie hier versuchen, einer den anderen aufzublasen, dann wird immer derjenige gewinnen, der gerade weniger Gas enthält. Es gibt also zwei stabile Zustände. Der Luftspeicher in Figur 12 überträgt ein aufgenommenes Volumen V auf so ein Gummiballonpaar und übernimmt damit auch dessen Gegendruck p . Die vermutete Kennlinie ist unten dargestellt.

Ein bistabiler Luftspeicher mit Gummiballons ist ausgesprochen einfach und billig herzustellen, und er besitzt kaum träge Masse. Um zu schwingen, kann er mit Masse von anderer Stelle zusammenwirken, zum Beispiel mit der Wassersäule der Wellenkammer.

Mit vorliegender Erfindung werden die folgenden Vorteile erreicht.

Der nichtlineare Luftspeicher schützt die Pumpkaskade vor zu großem Druckunterschied, das Pumpwasser läuft nicht mehr über. Anders als mit einem Überdruckventil geht die Energie der Druckspitzen nicht verloren, sondern wird gespeichert und bei nächster Gelegenheit wiederverwendet. Der Zeitverlauf des Drucks wird in Richtung einer Rechteckschwingung verzerrt, die zum Antrieb der Pumpkaskade sehr viel besser geeignet ist als die natürliche Wellenform. Die Wellenpumpe wird effizienter.

Ein willkommener Nebeneffekt ist, dass der nichtlineare Luftspeicher zusammen mit träger Masse zum Schwinger werden und Schwingungsenergie speichern kann. Er wirkt dann wie eine Art Schwungrad, das die Unregelmäßigkeiten der Meereswellen auszugleichen sucht. Die Wellenpumpe wird zuverlässiger.

Auch andere Wellenenergiewandler könnte man mit nichtlinearen Luftspeichern effizienter und zuverlässiger machen, insbesondere solche mit Luftturbine.

Nachfolgend werden die Zeichnungen näher erläutert. Die Ziffern bezeichnen: Wellenkammer (1), Pumpkaskade (2), Druckbegrenzer (3), Volumenbegrenzer (4), Wellengewässer (5), Ufergrund (6), Pumpgefäß der Pumpkaskade (7), Zufluss der Pumpkaskade (8), Abfluss der Pumpkaskade (9), Schwingtür (10), Rückstellmechanik (11), Gummiballon (12).

Figur 1 zeigt eine Wellenpumpe mit Druckbegrenzern (3) nach der zweiten Wasserpendel-Bauart, von denen der unterste ein einseitiger ist, der also nur negative Halbwellen begrenzt. Die oben verengte Wellenkammer wirkt zusätzlich als einseitiger Volumenbegrenzer (4) für positive Halbwellen.

Figur 2 zeigt eine Wellenpumpe mit Druckbegrenzer (3) und Volumenbegrenzer (4) nach der ersten Wasserpendel-Bauart.

Figur 3 zeigt eine Wellenpumpe mit bistabilem Volumenbegrenzer nach der Schwingtür-Bauart.

Figur 4 zeigt zwei Wasserpendel mit plötzlicher Querschnittsänderung auf der Höhe s . Links verengt sich der Querschnitt, rechts erweitert er sich, und zwar vom Ruhepegel 0 aus betrachtet.

Figur 5 zeigt links einen Volumenbegrenzer und rechts einen Druckbegrenzer nach einer ersten Wasserpendel-Bauart.

Figur 6 zeigt links einen Volumenbegrenzer und rechts einen Druckbegrenzer nach einer zweiten Wasserpendel-Bauart.

Figur 7 zeigt einen Druckbegrenzer nach der zweiten Wasserpendel-Bauart mit Kennlinie.

Figur 8 zeigt die Verzerrung des Drucks bei sinusförmigen Wellen.

Figur 9 zeigt wie ein Druckbegrenzer zum Überdruckventil werden kann. Die Kreise sind durchperlende Luft.

Figur 10 zeigt zwei komplementäre Druckbegrenzer in Parallelschaltung und wie aus deren Kennlinien eine neue entsteht.

Figur 11 zeigt einen bistabilen Volumenbegrenzer mit Schwingtür (10) und nichtlinearer Rückstellmechanik (11).

Figur 12 zeigt einen bistabilen Volumenbegrenzer mit zwei Gummiballons (12).

Patentansprüche

1. Wellenenergiewandler nach dem Prinzip der schwingenden Wassersäule, insbesondere eine Wellenpumpe, umfassend

eine Wellenkammer (1), die Bewegungsenergie von
Gewässerwellen in einen wechselnden Luftstrom umwandelt,

ein Wechseldrucknutzer, der den wechselnden Luftstrom in
eine nützlichere Energieform überführt, insbesondere
eine Pumpkaskade (2) zum Wasserpumpen, oder auch eine
Luftturbine mit Stromgenerator,

ein Luftspeicher, der Luft aus dem wechselnden Luftstrom
aufnehmen und auch wieder an diesen abgeben kann,

dadurch gekennzeichnet,

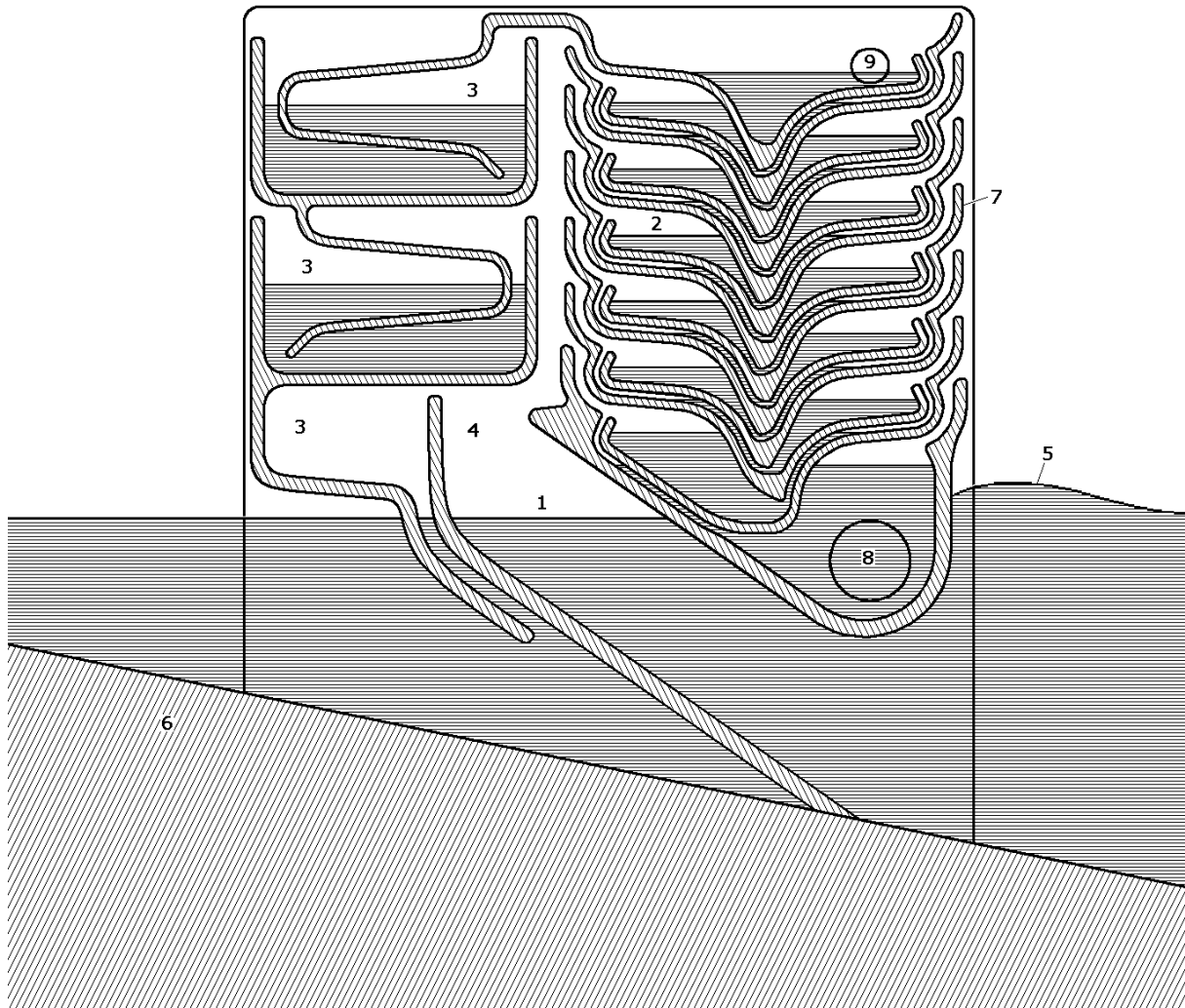
dass der Luftspeicher eine nichtlineare Druck-Volumen-
Kennlinie aufweist, wodurch im Zeitverlauf der Druck am
Wechseldrucknutzer gegenüber der Volumenauslenkung der
Wellenkammer gezielt verzerrt wird, und zwar in einer
für den Wechseldrucknutzer günstigen Weise.
2. Wellenenergiewandler nach dem vorhergehenden Anspruch,
wobei der Druckverlauf gegenüber dem Volumenverlauf
gezielt in Richtung einer Rechteckschwingung verzerrt
wird, dass also der Druck jeweils möglichst lange in
einem von zwei günstigen Arbeitsbereichen des
Wechseldrucknutzers bleibt, und dass die Zeiten des
Übergangs möglichst kurz sind.
3. Wellenenergiewandler nach einem der vorhergehenden
Ansprüche, wobei ein Luftspeicher speziell als

Druckbegrenzer (3) oder als Volumenbegrenzer (4) ausgelegt ist.

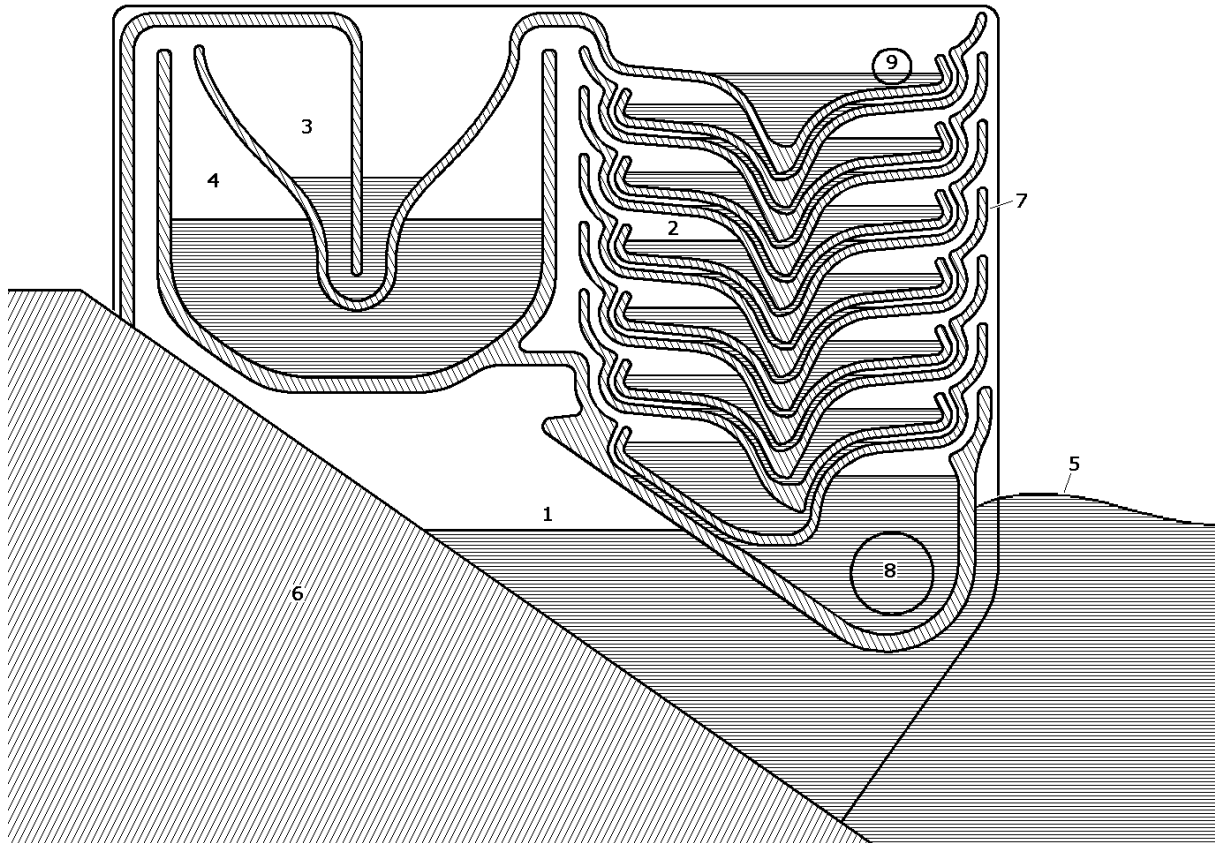
4. Wellenenergiewandler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein Luftspeicher bistabiles oder multistabiles Verhalten zeigt, in Übereinstimmung stabiler Zustände mit den Arbeitsbereichen des Wechseldrucknutzers.
5. Wellenenergiewandler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein Luftspeicher im Zusammenspiel mit träger Masse zum Schwinger wird, insbesondere zum Zweck des Ausgleichs von Schwingungsenergie über mehrere Wellenperioden, oder auch als Frequenzfilter.
6. Wellenenergiewandler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein Luftspeicher ausgeführt ist als ein System kommunizierender Gefäße, insbesondere als U-Rohr, in dem aufgenommene Luft wenigstens eine Pegeländerung einer darin befindlichen Steigflüssigkeit bewirkt, und dessen Querschnittsverlauf entsprechend einer gewünschten Kennlinie gestaltet ist.
7. Wellenenergiewandler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein Luftspeicher ausgeführt ist als ein Behälter mit veränderlichem Volumen und einer der gewünschten Kennlinie entsprechenden Rückstellkraft.
8. Wellenenergiewandler nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Wellenkammer die Funktion eines nichtlinearen Luftspeichers mit übernimmt und zu diesem Zweck einen besonderen Querschnittsverlauf aufweist.

Zusammenfassung

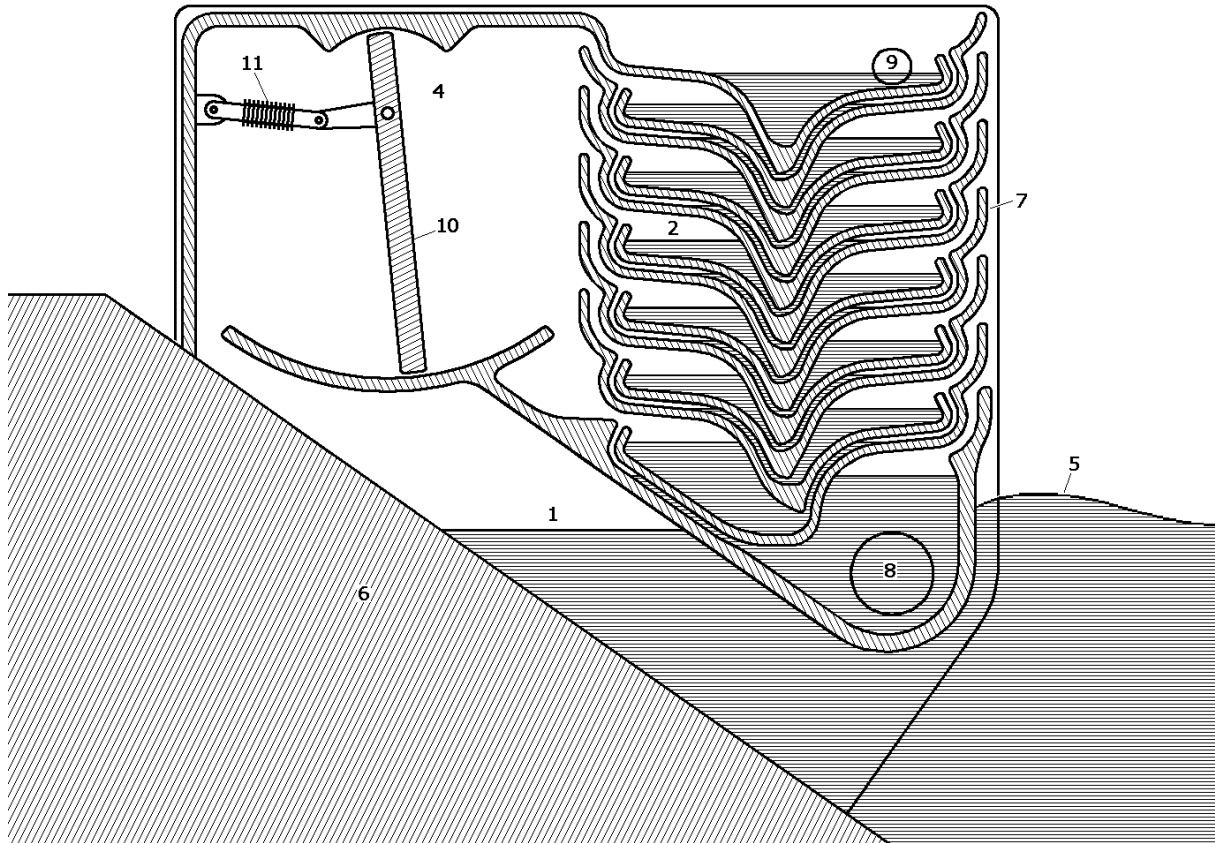
Die Wellenpumpe bekommt einen nichtlinearen Luftspeicher, der den wechselnden Luftdruck in ihrem Inneren gegenüber der natürlichen Wellenform verzerrt, so dass die Pumpkaskade effizienter und zuverlässiger arbeitet.



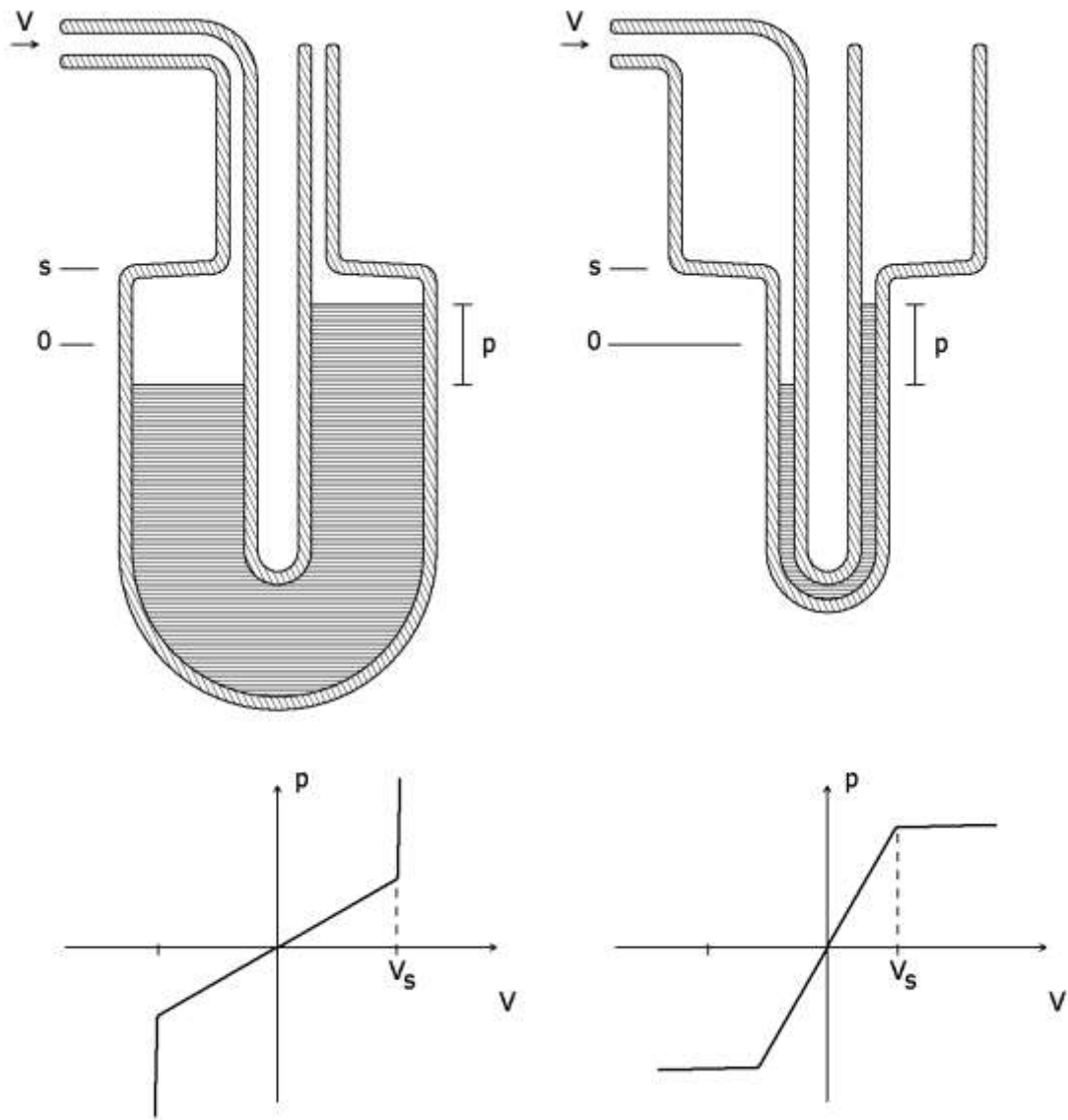
Figur 1. Wellenpumpe mit Druckbegrenzern nach der zweiten Wasserpendel-Bauart und mit zugespitzter Wellenkammer.



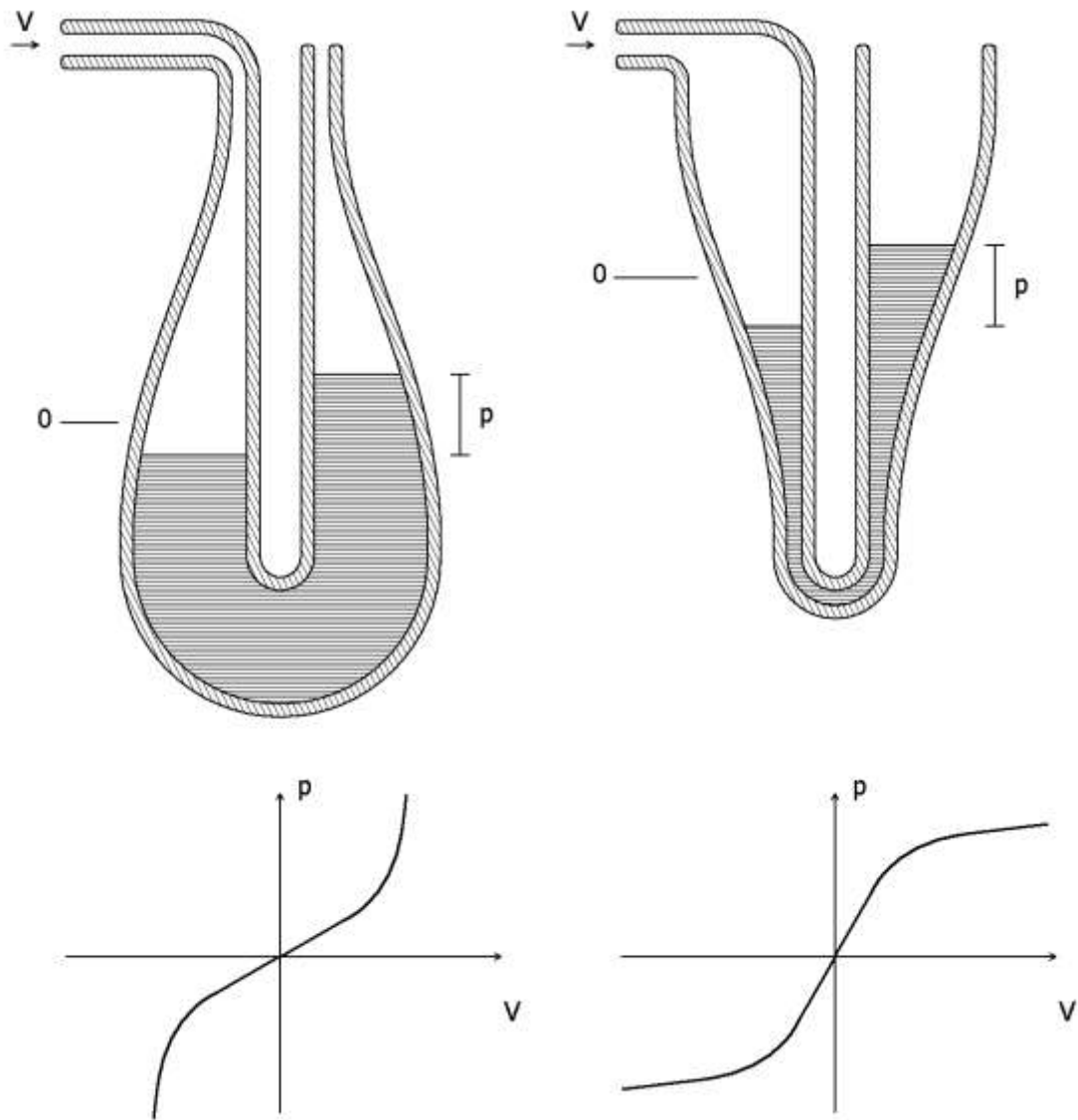
Figur 2. Wellenpumpe mit Druck- und Volumenbegrenzer nach der ersten Wasserpendel-Bauart.



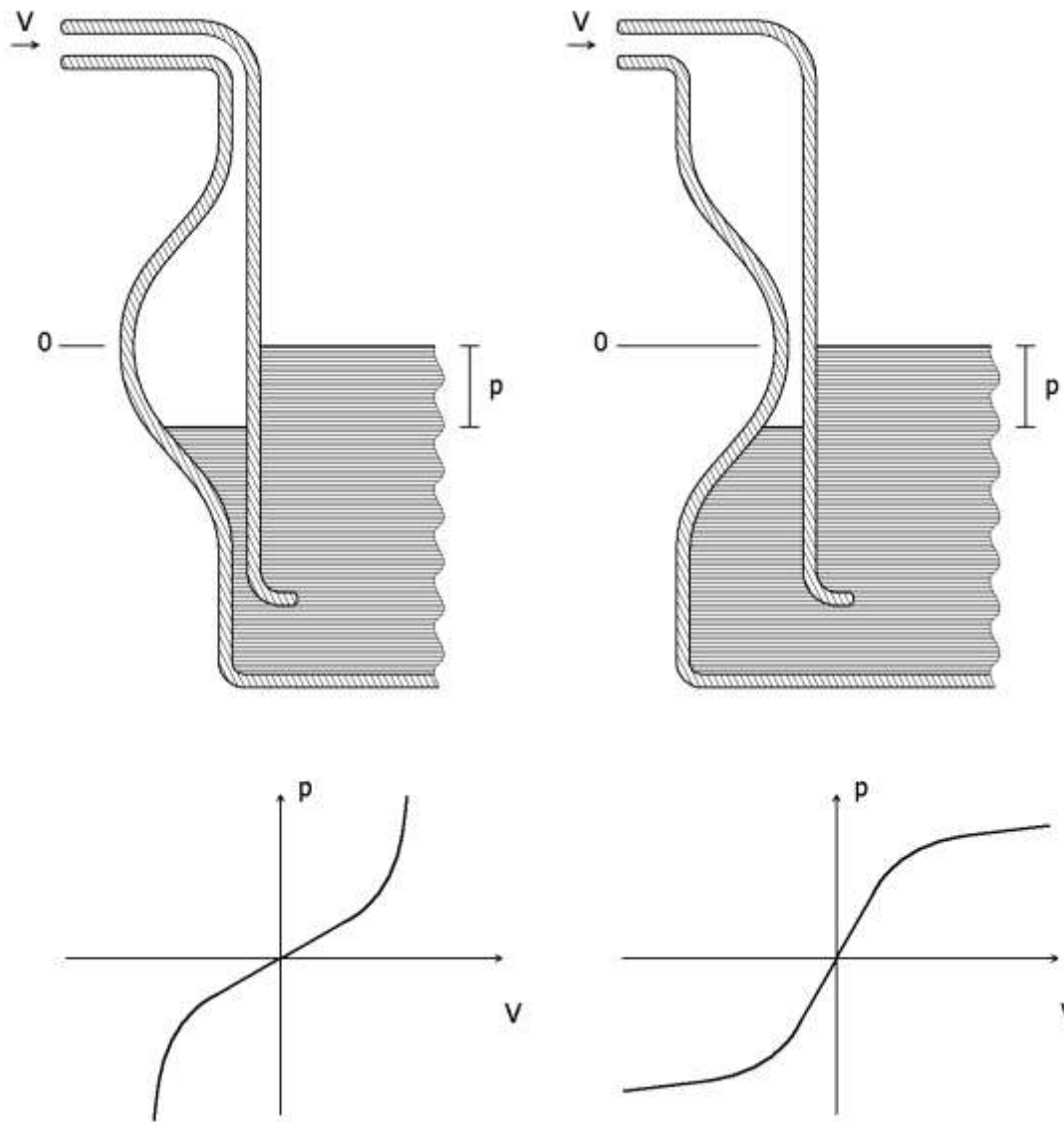
Figur 3. Wellenpumpe mit bistabilem Volumenbegrenzer nach der Schwingtür-Bauart.



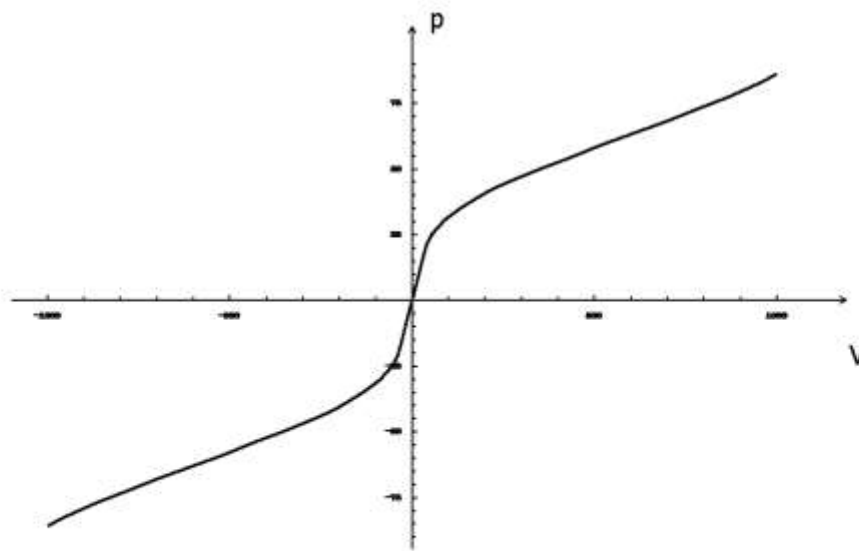
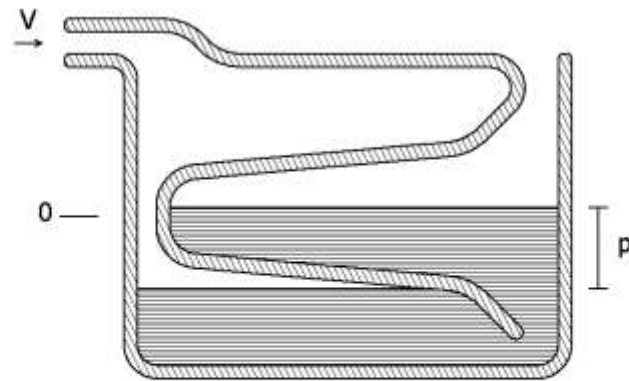
Figur 4. Wasserpindel mit plötzlicher Querschnittsänderung.



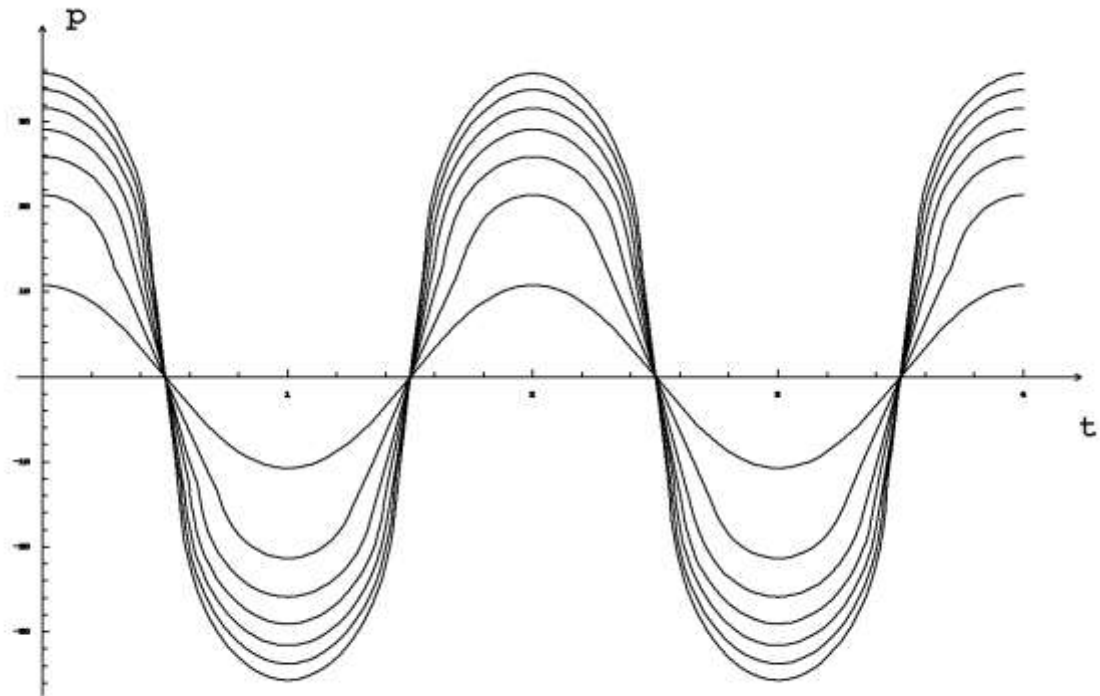
Figur 5. Volumenbegrenzer und Druckbegrenzer nach einer ersten Wasserpindel-Bauart.



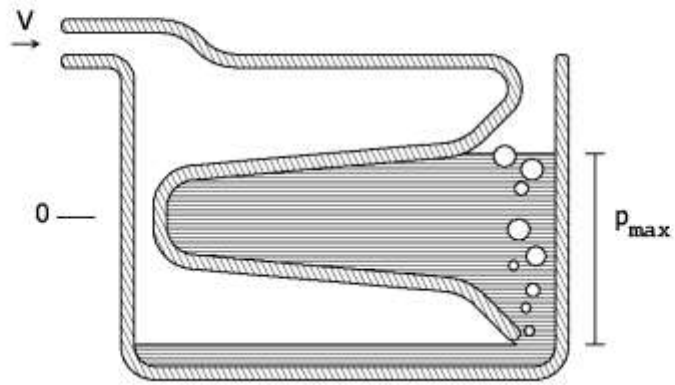
Figur 6. Volumenbegrenzer und Druckbegrenzer nach einer zweiten Wasserpendel-Bauart.



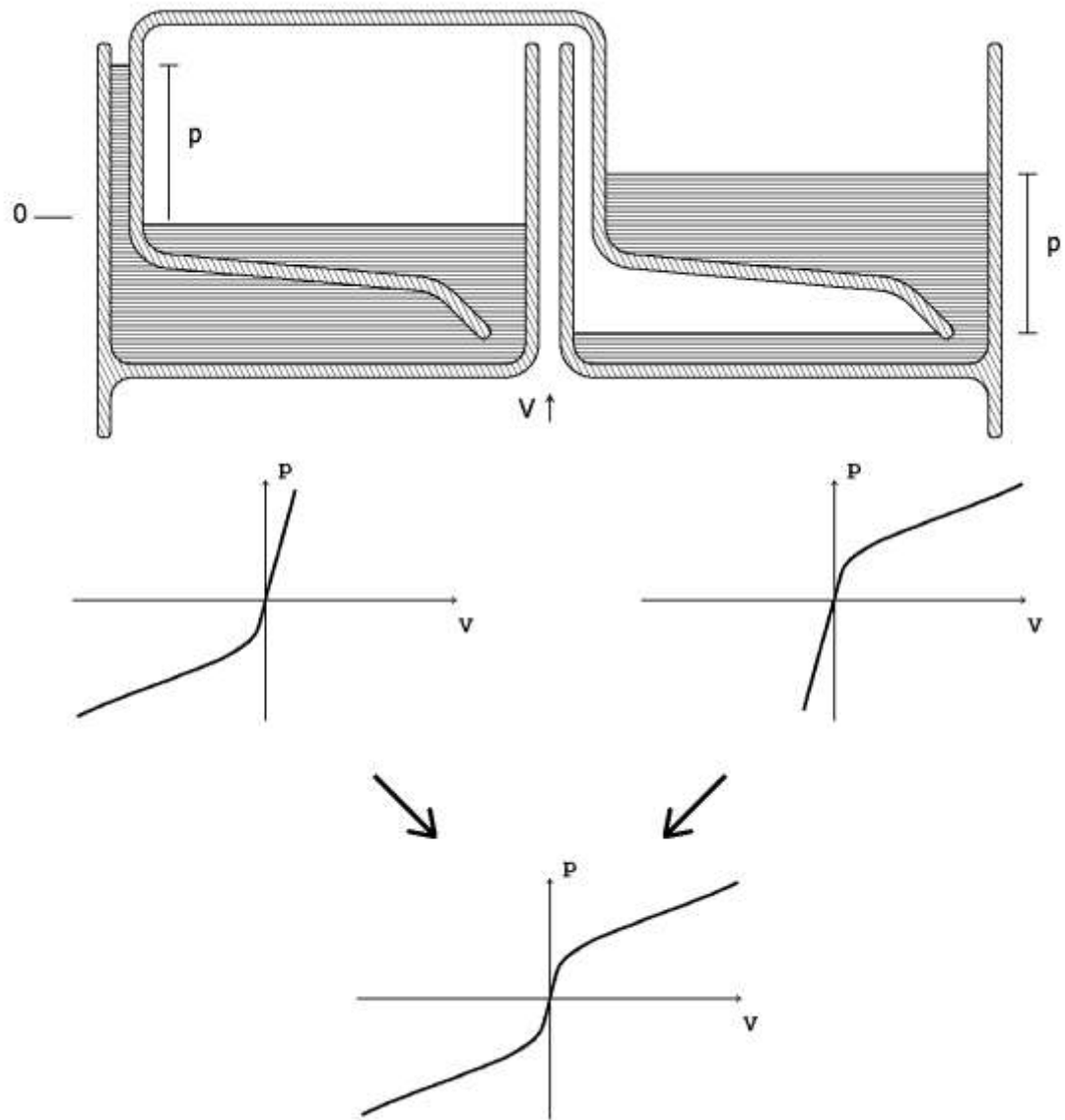
Figur 7. Druckbegrenzer nach der zweiten Wasserpendel-Bauart mit Kennlinie.



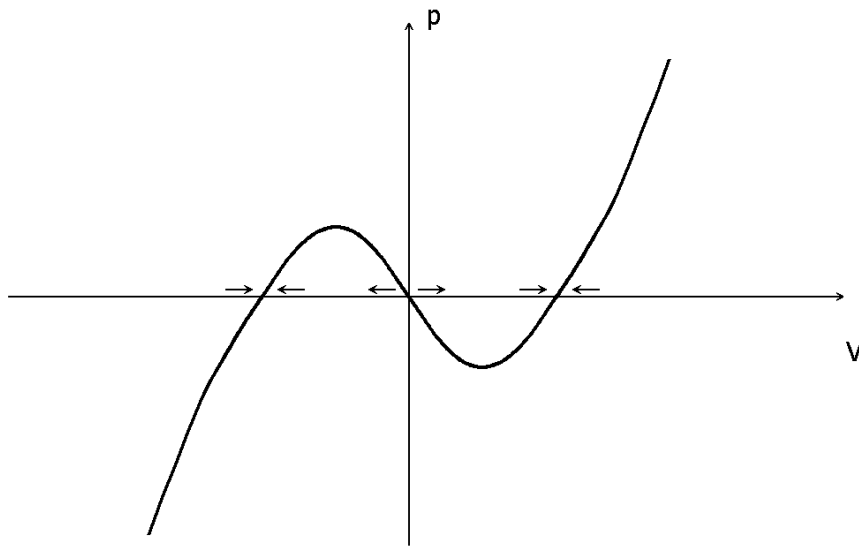
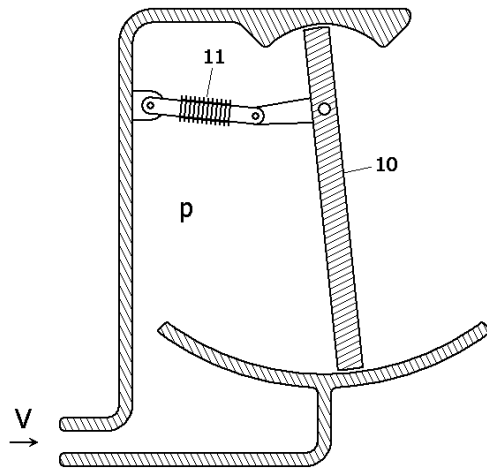
Figur 8. Verzerrung des Drucks bei sinusförmigen Wellen.



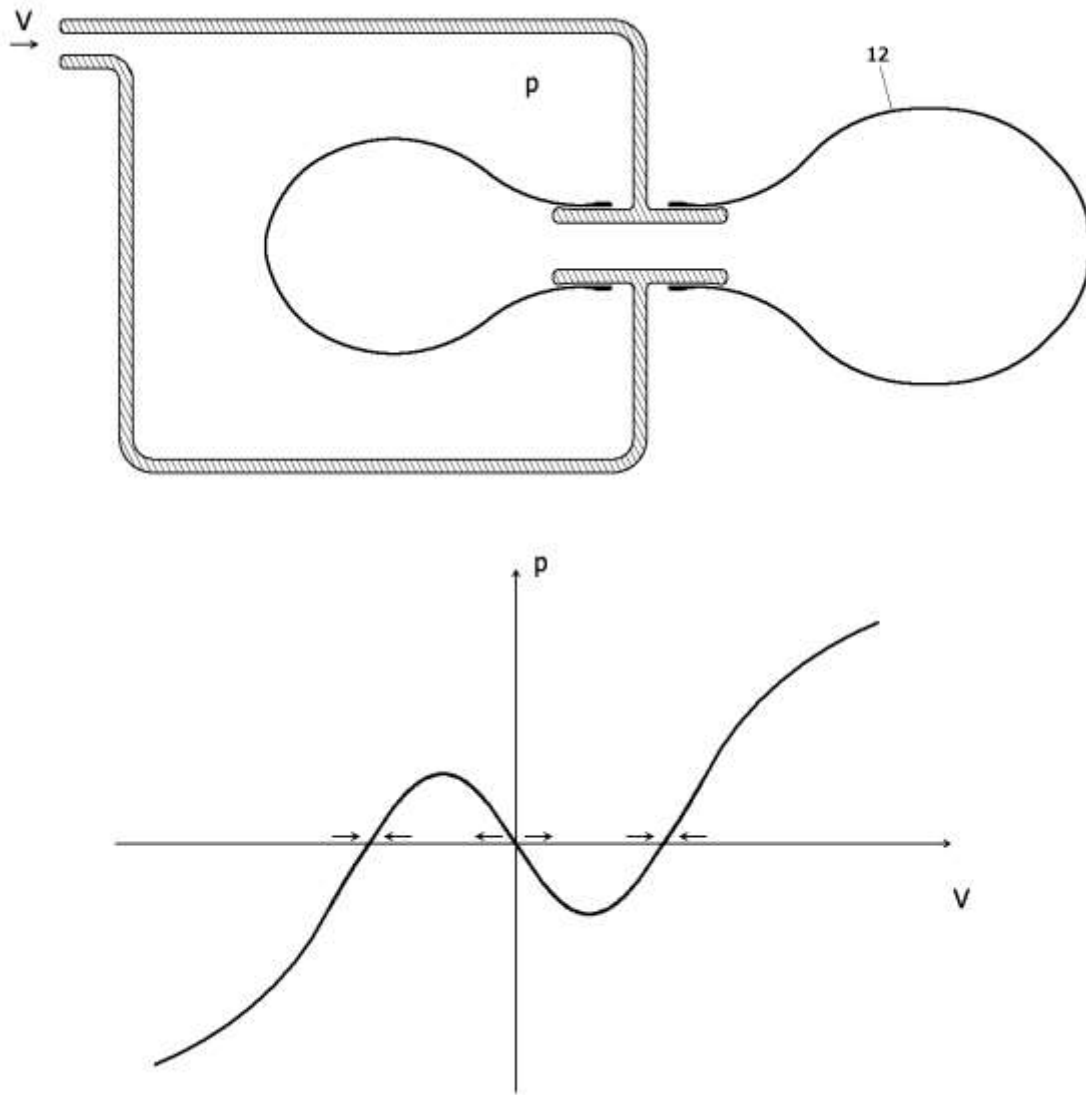
Figur 9. Druckbegrenzer wird zum Überdruckventil.



Figur 10. Komplementäre Druckbegrenzer.



Figur 11. Bistabiler Volumenbegrenzer mit Schwingtür.



Figur 12. Bistabiler Volumenbegrenzer mit zwei Gummiballons.