

AUFWAND UND NUTZEN GROSSER PROJEKTE – DIE FONTÄNEN VON SANSOUCI

Zusammenfassung

Der erste Versuch, Fontänen in Sanssouci springen zu lassen, wurde im Jahr 1749 kurz nach der Erbauung des Schlosses unternommen. Er misslang. War die Ausgabe von 400 000 Talern während der Regierungszeit Friedrichs II. verschwendetes Geld, dem die Nachwelt lediglich einige schöne Skulpturen verdankt?¹ Leonhard Eulers Begriff des ›Effekts‹ unterscheidet sich vom ökonomischen Aufwand-Nutzen-Verständnis jener Zeit. Er findet Anwendung bei der Berechnung einer Maschine anhand einer Energiebilanz: der Bernoulli-Gleichung. Während Euler durch seine Berechnungen den ›Effekt‹ der Pumpenanlage durch eine zunehmende ›Perfection‹ der Maschine verbessert, ihm also die Optimierung der Konstruktion gelingt, blieb ironischerweise der praktische ›Effekt‹ in Form einer erfolgreichen Umsetzung zu Zeiten Friedrich II. aus. Wie sich der Erkenntnisprozess Eulers in Auseinandersetzung mit den praktischen Versuchen zur Installation der Pumpenanlage in Sanssouci in der Mitte des 18. Jahrhunderts entwickelt hat, ist bisher noch nicht untersucht worden und bildet die Hauptfragestellung der vorliegenden Arbeit.²

Abstract

The first attempt to install fountains at the Sanssouci Royal Palace of Frederik II in Potsdam dates from the year 1749, shortly after completion of the palace. It failed. Was the expenditure of 400,000 Talers on this project squandered money? What more did we get than a number of marvellous sculptures? Leonhard Eulers contribution to this first attempt to install the fountains led not only to new principles for the science of continuum mechanics and hydrodynamics, but also answered practical

¹ Gottgetreu, Moritz: *Der Fontainenbau in Sanssouci*. Berlin 1854, S. 1.

² Die Erbauung des Pumpwerks von 1842 wird ausführlich behandelt in: Kahlow, Andreas: *Das Pumpwerk für die Fontänen von Sanssouci* (Historische Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst, Bd. 2). Berlin 2017.

questions on how to design the pumps and water pipes for the fountains. His work was a precondition of the later success of the project. The paper focuses on the first period of development of the Sanssouci waterworks in the mid-18th century.

Verschwendung und Sparsamkeit: Friedrich II. und das Projekt der Fontänenanlage

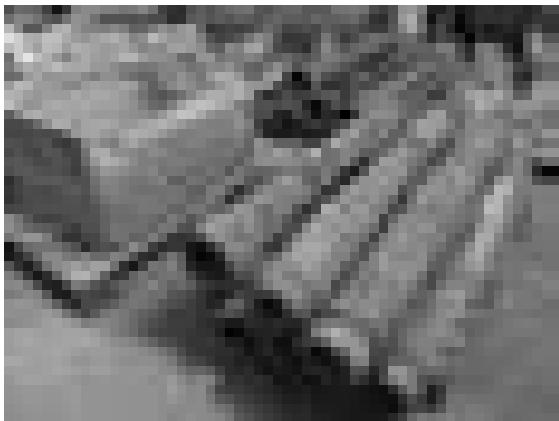
»[...] Das Amt, das ich übernehmen soll, liegt ganz außer dem Kreise meiner Neigung. Es ist praktisch so gut wie die anderen Finanzämter. Als der Minister mir von dem Effekt einer Maschine sprach, so verstand ich ganz natürlich darunter den mathematischen. Aber wie erstaunte ich, als sich der Minister deutlicher erklärte, er verstehe unter dem Effekt einer Maschine, nichts anders, als das Geld, das sie einbringt« (Heinrich von Kleist, 22. November 1800).³

Mit dem Ende des Zeitalters des ›Überflusses‹, des Barock, veränderte sich das Verständnis von ›Sparsamkeit‹ in Hinsicht auf deren quantitative Fassbarkeit sehr stark. Ein Schlüsselbegriff dieser Entwicklung war dabei der des ›Effektes‹. Er entwickelte sich zu einer naturwissenschaftlich-technischen Kategorie, dem Erhaltungssätze zugrundeliegen. Von einer Aufwand-Nutzen-Analyse für die Wasserspiele in Versailles war man zur Zeit Ludwigs XIV. (reg. 1643–1715) noch weit entfernt, ebenso gut hätte man die Frage nach dem ›Effekt‹ von Theateraufführungen oder höfischen Festen stellen können. Einige Jahrzehnte später jedoch änderte sich das Bild: Daniel Bernoulli errechnete den Wirkungsgrad der Anlage von Marly, er betrug $\frac{1}{56}$ der theoretisch erreichbaren Hebeleistung⁴. Seine Überlegungen wurden von Euler – wie später auszuführen sein wird – entscheidend weiterentwickelt.

Die Denkfigur einer Aufwand-Nutzen-Relation wird nachfolgend im doppelten Sinne benutzt: Zum einen in der Frage, ob beim Großprojekt von Friedrich II. die finanziellen Mittel sinnvoll eingesetzt wurden, zum anderen in der viel engeren Fragestellung nach der Herausbildung von naturwissenschaftlich-technischen ›Effizienz-kriterien‹. Interessant ist, dass trotz der Unterschiedlichkeit der beiden Denkebenen aus der Frage nach der ›Sparsamkeit‹ auch die Suche nach Naturgesetzen erwächst: Handelt die Natur sparsam und ›effektiv‹? Wie ist das Strömen des Wassers zu formulieren? Die Münze, mit der bezahlt wird, heißt Energie. Ihre Bilanzierung ist neu, begann in der Mechanik mit dem Prinzip der ›lebendigen Kräfte‹ und wurde von Daniel (1700–1782) und

³ von Kleist, Heinrich: Brief vom 22. 11. 1800 an Wilhelmine von Zenge. In: http://www.kleist-digital.de/brief?id=letters/b_029.xml (Zugriff: 21. 01. 2018).

⁴ Brandstetter, Thomas: *Kräfte messen. Die Maschine von Marly und die Kultur der Technik*. Berlin 2008, S. 53 ff.



*Abb. 1
Bei archäologischen Grabungen
gefundene Rohrleitung aus
Gusseisen für Fontänenanlagen
am Potsdamer Stadtschloss aus den
Jahren um 1711*

Johann Bernoulli (1667–1748) auf den Bereich flüssiger Körper übertragen. Auf die Weiterentwicklung dieser Denkweise durch Leonhard Euler sollen sich die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren. Damit beantwortet sich letztendlich auch die – rhetorisch gestellte – Frage nach dem Nutzeffekt des friderizianischen Fontänenprojektes.

Am Potsdamer Stadtschloss hatte es zu Zeiten des Kurfürsten Friedrich III. (ab 1701 König Friedrich I.) schon einmal Wasserspiele gegeben. Unter seinem Nachfolger, dem sparsamen Friedrich Wilhelm I. wurden sie – als unnütz – wieder beseitigt. Teile der vermutlich von Jean de Bodt kurz nach 1700 geschaffenen Anlage konnten bei Ausgrabungen zwischen 2006 und 2011 freigelegt werden (Abb. 1). Die gefundene Rohrleitung von ca. 1711 bestand aus Gusseisen, eine Tatsache, die Friedrich II. und den von ihm beauftragten Baumeistern als ‚Stand der Technik‘ eigentlich hätte geläufig sein müssen. Der neuen Anlage in Sanssouci hätten Gussrohre möglicherweise zu einem schnellen Erfolg verholfen. Ungeduld und Unkenntnis führten das Projekt in eine andere Richtung.⁵

Friedrich II. beauftragte zwei Holländer, den in Potsdam ansässigen Baumeister Johann Boumann (1706–1776) und den aus Amsterdam herbeigeholten Gärtner Heintze mit der Planung und dem Bau der Anlage. Die Idee, eine Newcomen-Dampfmaschine zu verwenden, wurde wegen der hohen Betriebskosten und auch wegen der Kompliziertheit der Anlage verworfen. Der Plan, mit Wasserrädern eine Pumpenanlage anzutreiben, war aufgrund der Geländetopografie fragwürdig. Es blieb die Überlegung, mit einer Kette von Windmühlen das Wasser in mehreren Stufen in ein Reservoir auf den etwa 50 Meter hoch liegenden Höneberg (den späteren Ruinenberg) zu heben. Wegen der Problematik ungleicher Pumpleistung von Stufe zu Stufe wurde der Plan dann auf nur eine Windmühle reduziert (Abb. 2).⁶ Die

⁵ Christl, Gundula (Stadtarchäologin von Potsdam): Mitteilung im Rahmen des Exkursionsprogramms zur 3. Tagung für Bautechnikgeschichte in Potsdam, 6. Mai 2017.

⁶ Artelt, Paul: *Die Wassertechnik von Sanssouci*. Berlin 1893.

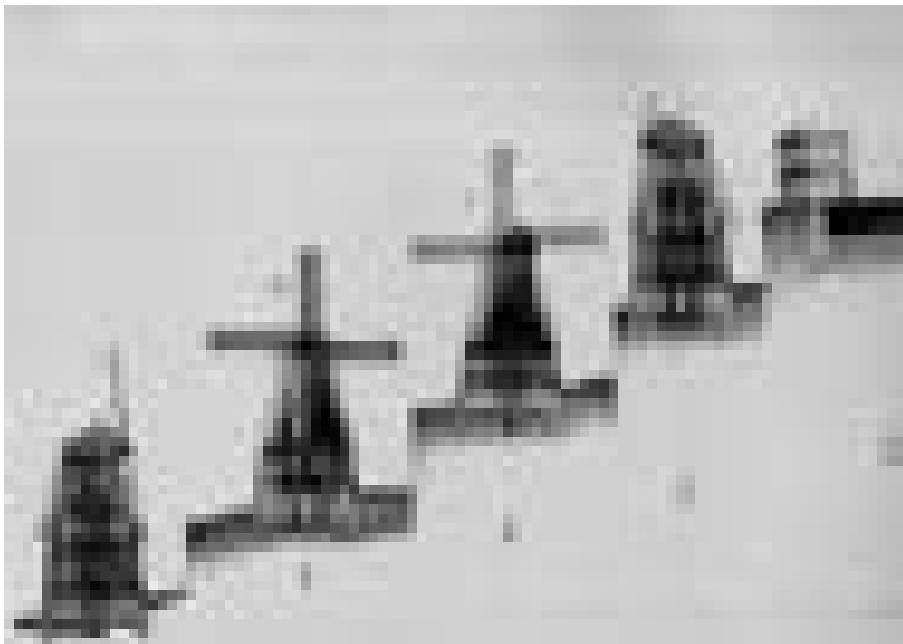


Abb. 2 Nicht verwirklichtes Projekt von vier Windmühlenpumpen

Entscheidung, die Zwischenstationen einzusparen, sollte sich als ebenso folgenschwer erweisen wie der Verzicht auf eine druckfeste Leitung aus Eisenrohren. Eine im Herbst 1748 fertiggestellte Holländerwindmühle mit einer liegenden Welle anstelle eines Mahlgangs trieb mit »gezahnten Eisen« ein Pumpwerk an, das das Wasser »in Steigeröhren nach dem Höheberge zu« pressen sollte – eine Druckpumpe.⁷

Noch im selben Jahr begannen die Arbeiten an der Rohrleitung. Sie bestand aus Holzdauben, die fassartig zusammengesetzt und mit eisernen Reifen versehen wurden. Sie wiesen Innen-durchmesser von sieben bis neun Zoll auf (18,30 bis 23,54 Zentimeter).

Im Frühjahr 1749 kam es beim ersten Versuch, Wasser in den Hochbehälter zu pumpen, bei etwa der halben Füllhöhe der Leitung zum Zerbersten der unteren Rohre. Sie waren offensichtlich nur für einen durch die Höhe bestimmten statischen – also geringen – Wasserdruk ausgelegt. Billige und schnell herstellbare Holzröhren schienen dafür ausreichend zu sein. In Marly hatte man nicht nur Eisenrohre verlegt, sondern auch eine durchgehende Druckleitung durch zwischengeschaltete Pumpstationen vermieden.⁸

⁷ Manger, Heinrich Ludewig: *Baugeschichte von Potsdam*, Teil 1. Potsdam 1789. Reprint Leipzig 1987, S. 95–96.

⁸ Ergang, Carl: *Die Maschine von Marly*. In: Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie 3 (1911), S. 139.

Leonhard Eulers Beteiligung am Fontänenprojekt

Leonhard Euler (1707–1783) war 1741 von Friedrich II. für den Neuaufbau der Akademie der Wissenschaften nach Berlin geholt worden, gelegentlich zog ihn der König jedoch auch zur Lösung anwendungsorientierter Aufgaben heran. Auf diese Weise war Euler im Mai 1749 an der Vermessung und Begutachtung des Finowkanals, einer wichtigen Verbindung zwischen Oder und Havel, beteiligt. Begleiter der Inspektionstour waren der ›Obristlieutenant‹ und Wasserbauer von Balby und der ›Castellan‹ und Baumeister Johann Boumann aus Potsdam.⁹ Es ist anzunehmen, dass Euler während der mehrtägigen Reise von Boumann erstmals Genaueres über die geplante Fontänenanlage erfuhr.

Ein erster konkreter Hinweis auf eine Beteiligung Eulers an diesem Projekt ergibt sich aus seiner Einbestellung bei Friedrich II. in Potsdam am 6. September 1749. Es war das erste Mal, dass Euler den König persönlich traf.¹⁰

Zu beiden den König interessierenden Themen arbeitete Euler im Anschluss Vorlagen aus, seine Ausarbeitung über eine ›italienische‹ Lotterie schickte er am 17. September direkt an ihn,¹¹ bei der ›Machine hydraulique‹ für die Fontänenanlage jedoch sandte er sein Manuskript am 21. September zunächst an den Akademiepräsidenten Pierre Louis Moreau Maupertius (1698–1759), der es – sollte er nichts einzuwenden haben – dem König weiterleiten sollte.¹² Kurz zuvor hatte sich Euler in einer Arbeit von Johann Friedrich Weidler *De Machinis Hydraulicis* (1728 und 1733) über das Hebework von Marly informiert.¹³ Er kannte ebenso das Werk von Jacob Leupold *Schau-Platz der Wasser-Künste* (1724/1725), das gleichermaßen diese Anlage beschreibt sowie die grundlegende Arbeit von Edme Mariotte *Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides* von 1686. Zur Verfügung stand ihm auch Bernard Forest Bélidor's *Architecture Hydraulique* (Erstausgabe Paris 1737–1739), das neben der Marly-Maschine auch andere Wasserhebeanlagen behandelte. Das in zahlreichen Auflagen und mit Übersetzungen ins Deutsche publizierte Werk war eines der verbreitetsten Ingenieurhandbücher des 18. Jahrhunderts.¹⁴

⁹ Euler, Leonhard: *Leonhardi Euleri Opera Omnia*, Seria IV, Vol. 6, Hg. Constabel, P.; Winter, E.; Grigorijan, A. T. [u. a.], Basel 1986 [nachfolg. abgek.: EOO Briefe]. EOO Briefe, 14. 05. 1749, Doc. 15a.

¹⁰ Ebd., 18. 09. 1749, Doc. 53, S. 136.

¹¹ Ebd., 17. 09. 1749, Doc. 17.

¹² Ebd., 21. 09. 1749, Doc. 54 und Annexe I.

¹³ Ebd., 18. 09. 1749, Doc. 53.

¹⁴ Ebd., 21. 09. 1749, Doc. 54.

Abb. 3
*Die Prinzipskizze Leonhard
Eulers für die Druckleitung in
seinem Brief vom 21. 09. 1749 (vgl.
Anm. 15) ist seiner später gedruckten
Abhandlung: *Sur le mouvement
de l'eau par le tuyaux de conduit*
(S. 148) entnommen (vgl. Anm. 34)*

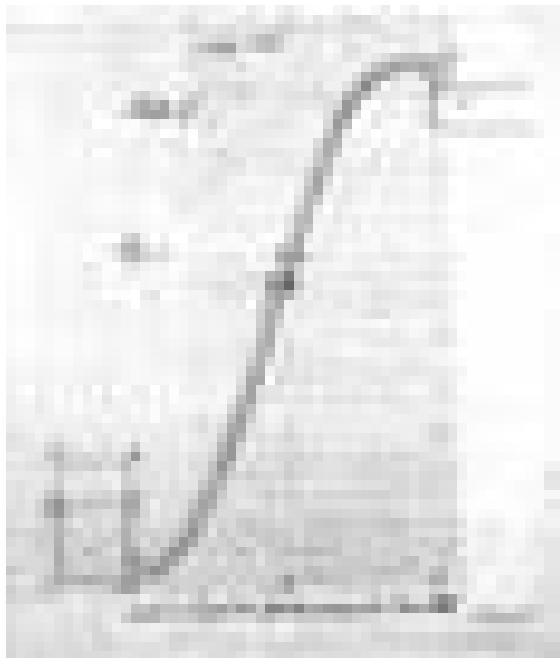


Abb. 4 Abhängigkeit des Steigrohrdrucks in Abhängigkeit von der Dauer eines Pumpenspiels in Sekunden

Erste Arbeit Leonhard Eulers über Rohrleitungen vom 21. September 1749

In seinem ersten Manuskript für Friedrich II. über die »Machine hydraulique«, von der nur eine auszugsweise Kopie von Maupertius erhalten geblieben ist, ermittelt Euler auf nur wenigen Seiten die Arbeit der ›lebendigen Kräfte‹ beim Niedergehen des Kolbens (Abb. 3).¹⁵ Diese Arbeit drückt er mit der äquivalenten Druckhöhe einer Wassersäule aus, benutzt also schon das Konzept der ›Energiehöhenlinie‹. Euler zeigt, dass sich mit einer schnelleren Bewegung des Pumpenkolbens ein höherer Druck in der Leitung aufbaut als bei langsamerer Förderung (Abb. 4).¹⁶

Konkret betrachtet Euler das Zusammenwirken eines Pumpwerks von acht Kolben, die ein Pumpenspiel von sechs Fuß und eine Kolbenfläche von jeweils 30 Quadratzoll besitzen, mit einer Bleileitung von $3 \frac{1}{2}$ Zoll Weite – behandelt also zunächst nicht die geplatzte Holzleitung. In seinem Anschreiben an Maupertius bemerkt Euler, dass er fürchte, die gewünschte Höhe der Fontäne von 100 Fuß (etwa 31 Meter) – könne nicht erreicht werden, Genaueres berechne er in den nächsten Tagen.¹⁷ Eine gute Woche später bewegt ihn jedoch die Festigkeit der Röhren weitaus mehr. Am 30.09.1749 schreibt er Maupertius, dass er bei seinen Berechnungen von den Maßen ausgegangen sei, die ihm Johann Boumann mitgeteilt habe. Wenn man diese verändere, so müsse man auch neue Tafeln berechnen. Er habe inzwischen gelesen, was Bélidor geschrieben habe; dieser habe die Wandung der Leitungsrohre viel stärker angegeben, als es nach Mariotte für eine ruhende Wassersäule nötig sei. Bélidor wären Mariottes Röhrenmaße wahrscheinlich als zu schwach erschienen, weil er der ruhenden Wassersäule zurechne, was durch die Aktion der Maschine erfolge. Um [in Potsdam] sicherzugehen, müsse man Experimente ausführen; man riskiere zu viel wenn man sich bei der Bestimmung der Stärke der Rohrwandung auf den Zufall verließe.¹⁸ Eulers Brief drückt die Erkenntnis, dass durch die Aktion der Maschine eine Druckerhöhung erfolgt, deutlich aus. Hatte Bélidor dieses Phänomen überhaupt bemerkt oder ging er tatsächlich immer nur vom Druck der ruhenden Wassermasse aus?¹⁹ Bei einem von Bélidor behandelten Beispiel geht es um eine Pumpenanlage am Pont Notre Dame in Paris (Abb. 5–6).²⁰ Sie habe Fehler, meint Bélidor, die vor allem die Rohrverengungen und die Ventile betrafen; es würde zu viel Kraft verbraucht, um das Wasser mit »Gewalt« zu zwingen,

¹⁵ Ebd., Annexe I, S. 264.

¹⁶ Ebd., S. 266.

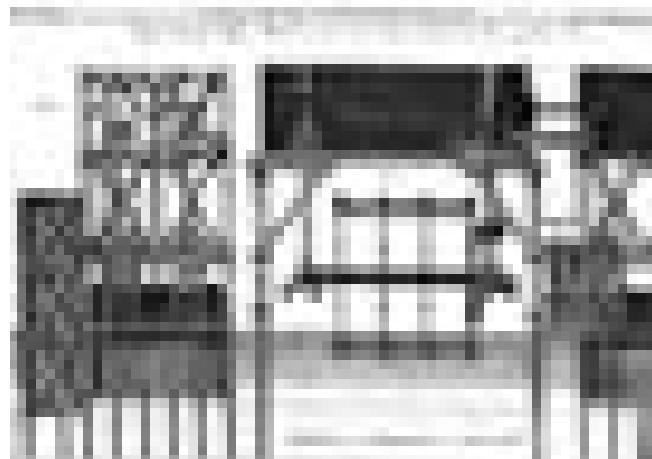
¹⁷ Ebd., 21.09.1749, Doc. 54.

¹⁸ Ebd., 30.09.1749, Doc. 55.

¹⁹ de Bélidor, Bernard Forest: *Architecture Hydraulique*, 2 Vol. Paris 1737–1739. Der behandelte Abschnitt im Vol. I, Livre III, Chap. V, insbesondere §§II17 bis §§II20, S. 214 entspricht der deutschen Ausgabe Bélidor, Bernard Forest de: *Architectura Hydraulicæ, I. Teil, drittes Buch, Cap. V*. Augsburg 1745. Von der Verbesserung derer Parisischen Wasser-Plompen, §§II17 bis §§II20, S. 9.

²⁰ Ebd., Tab. II–III.

*Abb. 5
Wasserhebemaschine am
Pont Notre Dame, Paris*



schneller zu fließen.²¹ Bélidor weiß also, dass das Wasser der Kolbenbewegung Widerstand leistet, ordnet diesen jedoch der Reibung des Wassers an der sich verengenden Rohrwandung zu. Die Erkenntnis, dass es sich um Trägheitskräfte handelt, gewinnt erst Euler, er errechnet ihre Arbeit an einem »herausgeschnittenen« Volumenelement (siehe Abb. 3).

Folgende Bemerkung aber wird Euler aus Bélidors Werk zur Beschreibung des Zustandes der Potsdamer Maschine fast wörtlich übernehmen: »Die obigen angeführten Fehler oder Mängel, tragen selbst zum Untergang der Maschine viel mit bey«.²²

Zweite Arbeit von Leonhard Euler für Friedrich II. vom 17. Oktober 1749

In den darauffolgenden gut zwei Wochen wird Euler klar, dass Johann Boumann die Ersatzleitung wiederum als eine Holzleitung und nicht aus Blei oder aus Eisen ausführt. Dies war ein Alarmzeichen.

In einem Schreiben, das seine Forschungen der letzten Wochen zur ›Machine hydraulique‹ zusammenfasste, wandte sich Euler am 17. Oktober nun direkt an den König.²³ Darin behandelt er zunächst den ›Effekt‹ einer Windmühle, um dann zum ›Grad der Perfektion‹

²¹ Ebd., S. 9 »[...] Weilen nun die Friction oder das Anreiben des Gewässers an denen innern Flächen oder Wänden dieser Aufsatz-Röhren, um so viel grösser oder heftiger werden muß [...] entstehen hieraus abermahlen neue Hindernisse, welche [...] Ursach sind, daß der Strohm den meist größten Theil seiner Gewalt anwenden muß, nicht sowohl diejenigen Wassersäulen in die Höhe zu heben, die biß in die Austheilungs-Behälter hinauf steigen, als vielmehr diejenigen Hindernisse oder Widerstände zu überwältigen, welche kaum gedachte Wassersäulen unter wegens antreffen [...]«.

²² Ebd., S. 9.

²³ EOO Briefe, 17.10.1749, Doc. 19.

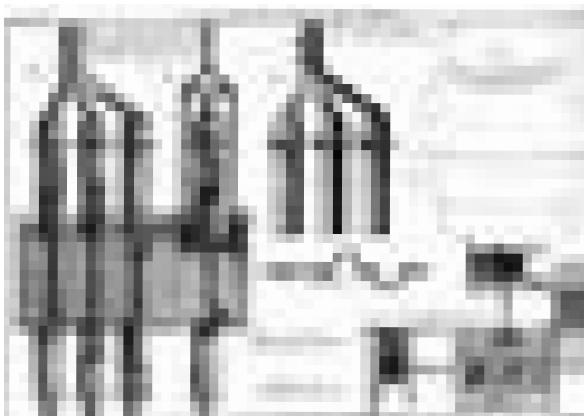


Abb. 6
Wasserhebemaschine am Pont
Notre Dame, Paris

der Pumpenanlage sowie den Druckverhältnissen in der Steigleitung zu kommen. Die Regeln, die er abgeleitet habe, schreibt Euler, haben ihn unter anderem erkennen lassen, dass die Maschine am Pont Notre Dame in Paris dreimal mehr Wasser fördern könnte als es gegenwärtig der Fall sei.²⁴ Anschließend gibt er die Hauptdaten der ›Machine hydraulique‹ von Sanssouci an: Die Flügel der Windmühle haben 40 Fuß Länge und acht Fuß Breite, die Welle laufe bei einer Windgeschwindigkeit von 20 Fuß pro Sekunde in 16 ½ Sekunden einmal um. Alle vorhandenen zehn Pumpen (im Manuskript zuvor waren acht erwähnt), mit denen die Mühle ausgestattet sei, sollen bei dieser Geschwindigkeit in Betrieb sein. Wehe der Wind schwächer, setze man entsprechend weniger Pumpen in Gang. Die Umdrehungszeit von 16 ½ Sekunden führt auf 218 Umdrehungen pro Stunde, womit sich 330 Kubikfuß Wasser pro Stunde heben lassen. Ein Reservoir von 195 000 Kubikfuß ist dann in etwa 25 Tagen bis zum Rand gefüllt. Wenn der Wind mit zehn Fuß pro Sekunde wehe, erst in 200 Tagen.

Zunächst scheinen Eulers Ausführungen durchaus für einen erfolgreichen Betrieb der Wasserhebeanlage zu sprechen, wenn man davon absieht, dass sich das Bassin nur sehr langsam füllen ließ. Nachfolgend benennt Euler nun aber deren Defizite: Die Maschine sei vom Zustand der ›Perfektion‹ weit entfernt. Er geht auf das Versagen der Rohrleitung bei ihrem ersten Test ein: Was war die Ursache? Das größte Problem sei der Druck in der Steigleitung zum Reservoir.

Man näherte sich der ›perfekten‹ Maschine umso mehr, je weniger Druck auf die Leitung ausgeübt werde. Euler schreibt: »Es ist absolut erforderlich, die [beiden] Rohrleitungen weiter zu machen, die jetzt 5 Zoll Durchmesser haben [...] wenn man nichts ändert, ist es praktisch unmöglich, mehr als 160 Kubikfuß Wasser pro Stunde zu fördern und selbst dafür müssen die Pumpen noch beträchtlich verändert werden [...]. Im jetzigen Zustand kann nicht ein Tropfen Wasser ins Reservoir gehoben werden«, die aufgewendete Kraft würde nur dazu führen, »die Maschine und die Röhren zu zerstören«.²⁵

²⁴ Diese Bemerkung bezieht sich auf die Bélidorsche Darstellung dieser Maschine.

²⁵ EOO Briefe, 17.10.1749, Doc. 19, S. 321–322.

Die von Boumann und Heintze im Winterhalbjahr 1749/1750 in Angriff genommene neue Leitung entsprach in keiner Weise den Erfordernissen. Euler fordert nun konkret:

- 1) eine zwölf Zoll starke oder zwei 8 ½ Zoll starke Druckleitungen einzubauen,
- 2) während einer Umdrehung der Mühle sollte jeder Kolben nur ein Kolbenspiel haben,
- 3) die Hubhöhe des Kolbens sollte einen Fuß betragen,
- 4) der Durchmesser eines Pumpenkolbens sollte fünf Zoll haben.

Bei 20 Fuß Windgeschwindigkeit ergäbe sich alle 16 ½ Sekunden eine Umdrehung und damit würde eine Förderung von 263 Kubikfuß Wasser pro Stunde erreicht. Der Druck in den Röhren an der Basis betrüge dann 162 Fuß Druckhöhe.

Zwei weitere Varianten mit ähnlicher Wasserhebeleistung und Druckbelastung werden von Euler vorgestellt und darauf verwiesen, dass die Windmühle durch eine Maschine ersetzt werden kann, die mit 20 Personen oder drei Pferden betrieben wird.²⁶

In einem weiteren Brief an Maupertius vom 21. 10. 1749 beklagt sich Euler indirekt darüber, dass sein Rat übergangen wird. Der »ärgerliche Unfall« (das Zerspringen der ersten Leitung) sei im Grunde dadurch verursacht worden, dass die Kapazität der Pumpe für die Rohrleitung zu groß sei; man müsse sie beträchtlich vermindern, entweder, indem man die Durchmesser der ›Pumpenstiefel‹ (Zylinder) verringere, oder ihre Höhe oder die Anzahl der Pumpenspiele bei einer Umdrehung der Windmühle; ansonsten könne man »keinen Tropfen Wasser ins Reservoir« fördern. Eine – offensichtlich vorgeschlagene – Begradigung der Leitungsführung durch Bohrungen in den Berg würde viel kosten, aber keinen Nutzen bringen. Bei allen Maschinen, die vorgeschlagen würden, könne er schnell erkennen, ob sie funktionierten und welchen Grad der ›Perfektion‹ sie hätten. Wenn man nicht gegen seinen Rat handle, würden auch keine unnötigen Kosten entstehen.²⁷

Am 24. 10. 1749 teilt Euler Maupertius mit, dass er vor Kurzem neben der Begutachtung einer Sägemaschine noch einmal den Verbrauch der großen Fontaine für Sanssouci durchgerechnet und ermittelt habe, dass sie in 20 Stunden das ganze Reservoir leere. Für dessen Füllung benötige man mit einer Windmühle einen Monat. Pferdekräfte wären für diesen Zweck geeigneter. Euler schreibt: »Ich nehme mir die Freiheit, dem König ein Projekt zu präsentieren, wie man die Maschine so wie sie ist mit Leichtigkeit in einen Stand setzen kann, mit sechs Pferden das Reservoir in sechs Tagen zu füllen«.²⁸ Konkreter wird er in seinem Schreiben nicht. Die Herausgeber des Eulerschen Briefwechsels²⁹ bringen obige Bemerkung mit einem Dokument in Zusammenhang, in dem eine Pumpenwindmühle beschrieben wird, die »zugleich eine Roßmühle ist«.³⁰ Das Original dieser Projektbeschreibung ist im Preußischen Geheimen

²⁶ Ebd., 17. 10. 1749, Doc. 19.

²⁷ Ebd., 21. 10. 1749, Doc. 56, S. 139–140

²⁸ Ebd., 24. 10. 1749, Doc. 57, S. 140–142.

²⁹ Ebd., Winter, Eduard: *Introduction*. In: ebd., S. 284.

³⁰ Ebd., *Exposé du fonctionnement d'une machine hydraulique [d'Euler]*, Doc. 19a, S. 329.

Staatsarchiv zu finden, es ist eingebunden in ein Aktenstück, das auch Eulers Briefe an Friedrich II. vom 17. 09. 1749 (Doc. 17) und vom 17. 10. 1749 (Doc. 19)³¹ enthält. Aufgenommen wurde es in Eulers *Opera Omnia* als Dokument 19a im Annexeil des Briefwechselbandes.³² Weder die Handschrift noch die Art und Weise der Hervorhebung handwerklicher Einzelheiten oder der beschriebene Zweck der Anlage sprechen für eine direkte Zuordnung. Auch Eulers Methode, ausgehend von der Arbeit der ‚lebendigen Kräfte‘ zu einer Energie- beziehungsweise Arbeitsbilanz zu kommen, findet sich in dem Dokument nicht wieder. Ungeachtet dieser Zweifel soll die zum Dokument gehörende Zeichnung hier wiedergegeben werden, da sie von Euler zumindest wahrgenommen wurde und – wahrscheinlich – in Zusammenhang mit seiner obigen Bemerkung steht (Abb. 7).³³

Leonhard Eulers theoretische Arbeiten zum Pumpwerk von Sanssouci 1749 und 1750

Die Inhalte der an den König gesandten zwei Manuskripte bilden den Kern einer Arbeit, die von Euler am 23. Oktober 1749 an der Berliner Akademie verlesen wird: *Sur le mouvement de l'eau par des tuyaux de conduite* [Über die Bewegung des Wassers in Leitungsrohren].³⁴

Auf den ersten Seiten seiner Arbeit erläutert er, dass es zwar eine umfangreiche Literatur über die hydraulischen Maschinen gäbe, aber keiner der Autoren sich zur Geschwindigkeit des Wassers in Rohren geäußert habe. Erst Daniel Bernoulli habe in seiner exzellenten *Hydrodynamik* das Prinzip der Erhaltung der Kräfte zur Klärung dieser Frage benutzt und sein Vater Johann Bernoulli dann in seiner *Hydraulik* ‚allein mit den Mitteln erster Prinzipien der Mechanik‘ dieselbe Frage umfassend behandelt.³⁵ Im anschließenden Hauptteil seiner Arbeit kommt Euler zu dem, was die weitere Entwicklung der Hydrodynamik stark beeinflussen sollte: zu einer Formulierung des ‚inneren Drucks‘ in einer Rohrleitung.³⁶ Euler entwickelt eine allgemeine Theorie der Rohrströmung. Er begründet in seiner Arbeit für den Fall der Kolbenpumpe die Differentialgleichung der Strömung

³¹ Ebd., Doc. 17 (Anm. 11) und Doc. 19 (Anm. 23).

³² Ebd., Doc. 19a, S. 326–327.

³³ Euler, Leonhard [zugeordnet]: *Erweis einer Wassermaschine dadurch in einer Zeit von 12 Secunden 36 Tönnchen Wasser mit einem Pferde bis 5 Fuss hoch übergetrieben werden können* [ohne Datum]. Geheimes Staatsarchiv Preußischer Kulturbesitz, I. HA Rep. 96 R, Bl. 53/54.

³⁴ Euler, Leonhard: *Sur le mouvement de l'eau par le tuyaux de conduit*. In: Mémoires de l'académie des Sciences de Berlin 8 (1752), Berlin 1754, S. 111–148. Online abrufbar unter: http://bibliothek.bbaw.de/bbaw/bibliothek-digital/digitalequellen/schriften/anzeige/index_html?band=02-hist/1752&seite:int=160 (Zugriff: 12. 12. 2018). Wieder abgedruckt als E 206 in: *Leonhardi Euleri Opera Omnia*, Seria II, Vol. 15. Basel 1957, S. 219–250 (nachfolgend Benutzung von EEO und Eneström Index – hier E 206 – zur Werkbezeichnung).

³⁵ E 206 in EOO, II, 15, S. 222. Euler bezieht sich auf die 1738 von Daniel und 1742 von Johann Bernoulli erschienenen Arbeiten.

³⁶ Truesdell, Clifford Ambrose: *Rational Fluid Mechanics, 1687–1765*. In: ders. (Hg.): *Leonhardi Euleri Opera Omnia*, Seria II, Vol. 12. Lausanne 1954, S. XLV.

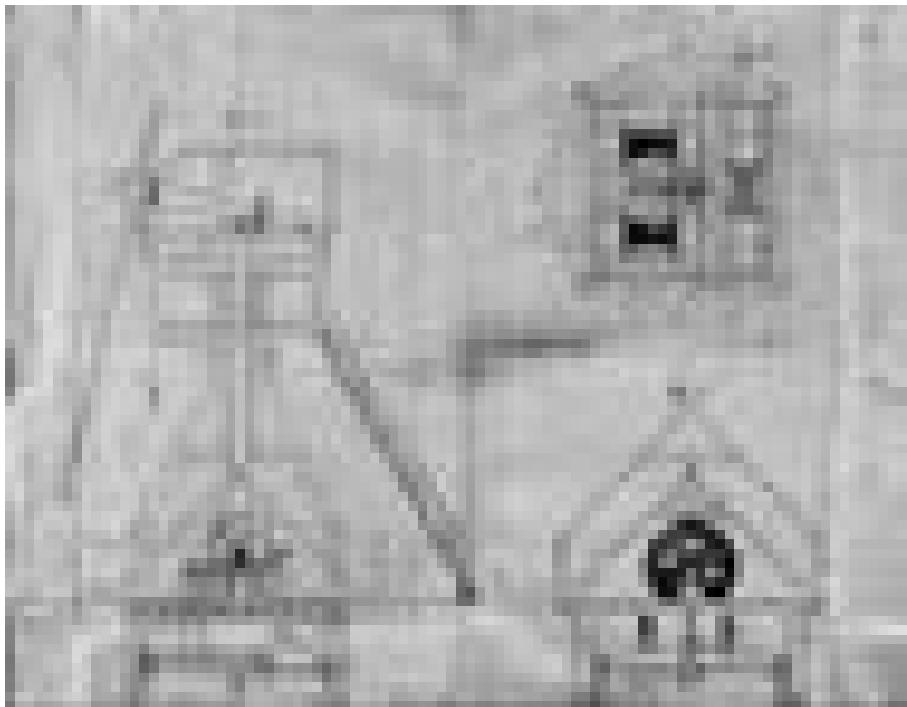


Abb. 7 Projekt einer Wasserhebeanlage mit einer Windmühle, die »zugleich eine Ross-Mühle ist«. Das Wasser wird nicht mit Kolbenpumpen, sondern mit Lederbälgen gefördert

im Steigrohr und gibt damit für einen technisch konkreten Fall erstmals die Lösung eines instationären Strömungsproblems an.³⁷

Sein Ergebnis fasst er in einer Tabelle zusammen, in denen die gegenseitige Abhängigkeit der geometrischen Größen von Pumpe und Leitung sowie den sich ergebenden hydraulischen Werten darstellt. Am Schluss stellt Euler noch einmal das Beispiel der Pumpenanlage von Sanssouci dar, bei dem die Leitung durch den hohen Druck des Pumpstoes zerstört worden war.

Aus den Werten, die Euler angibt, kann man den Aufbau der ersten Version des Potsdamer Pumpwerks entnehmen. Es hatte demnach einen Kolbendurchmesser von $\frac{4}{3}$ Fuß und einen Kolbenhub von vier Fuß. Die hölzerne Röhrleitung von $\frac{3}{4}$ Fuß = neun Zoll Durchmesser stimmt mit dem Maß überein, das von Heinrich Ludewig Manger angegeben wird. Bis zu der Stelle, an die das Wasser in der Leitung bis zu deren Versagen gestiegen war, werden 3 000 Fuß

³⁷ Zur Ableitung der Gleichungen vgl. Ackeret, Jakob: *Vorrede*. In: EOO II, Vol. 15, S. LI–LVI sowie Eckert, Michael: *Euler and the Fountains of Sanssouci*. In: Archive for History and Exact Sciences 56 (2002), S. 451–468.

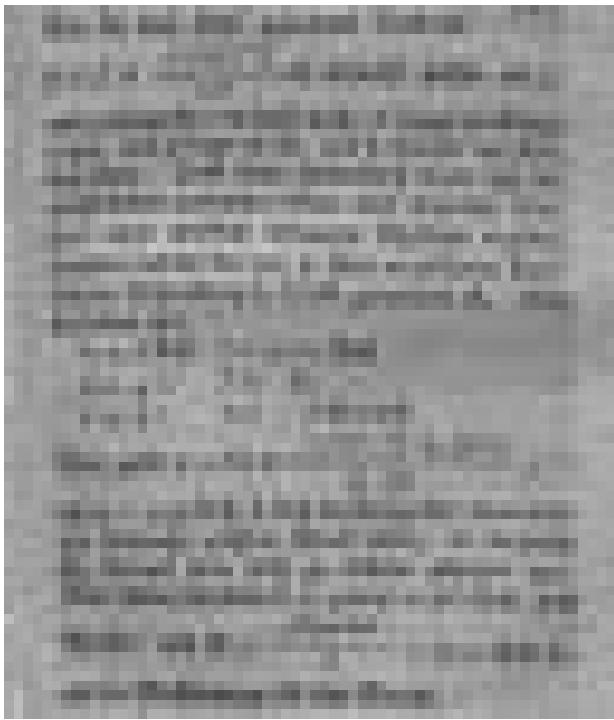


Abb. 8
Wenzeslaus Johann Gustav Karsten druckt Leonhard Eulers Berechnung des Potsdamer Pumpwerks 1770 wieder (auf Deutsch) ab

Länge und 60 Fuß Höhe angegeben.³⁸ Euler errechnet für den unteren Teil der Röhre einen Druck, der sich aus den beiden Anteilen 60 Fuß für den hydrostatischen Druck und 270 Fuß für den Druck infolge der Bewegungsenergie zusammensetzt, dies zusammen entspricht dem Druck einer 330 Fuß hohen Wassersäule.³⁹

Einen Tag, nachdem er seine Arbeit eingereicht hatte, schreibt Euler im bereits erwähnten Brief vom 24. Oktober 1749 an Maupertius, dass er beabsichtige, noch weitere Arbeiten zu dieser Problematik zu verfassen. Seine zweite Arbeit *Discussion plus particulière [...]* (E 207) wird am 20. November 1749 verlesen, sie fasst die verschiedenen Möglichkeiten des Pumpenantriebs durch Muskelkraft, Wasserräder und Windkraft zusammen.⁴⁰ Besonders in der dritten Arbeit, den *Maximes pour arranger [...]* (E 208) vom 5. Februar 1750 bemüht sich Euler, seine Schlussfolgerungen auch für Praktiker verständlich darzustellen und fasst die Resultate in Tabellenform zusammen.⁴¹

³⁸ Vgl. Manger 1987 (Anm. 7), S. 96.

³⁹ E 206 in EOO II, 15, S. 249–250.

⁴⁰ E 207 *Discussion plus particulière des diverses manières d'elever l'eau par les moyens des pompes avec le plus grand avantage* (EOO II, 15, S. 251–280). Auch in: Mémoires de l'académie des Sciences de Berlin 8 (1752).

⁴¹ E 208 *Maximes pour arranger le plus avantageusement les machines destinées à éléver l'eau par le moyen des pompes* (EOO II, 15, S. 281–318). Auch in: Mémoires de l'académie des Sciences de Berlin 8 (1752).

Das zweite Versagen der Rohrleitung 1750 und ein erster Erfolg 1754

Vielleicht kamen die Hinweise von Euler zu spät, vielleicht wollten Boumann und Heintze sie auch nicht zur Kenntnis nehmen. Manger berichtet, dass von März bis Dezember 1749 etwa 8 000 Fuß (ca. 2 510 Meter) Leitungsrohre von fünf, vier und bei einigen hundert Fuß sogar nur drei Zoll Weite hergestellt und verlegt wurden. Allerdings wurden auch fünf kupferne ›Windkessel‹ von insgesamt 29 ½ Zentner Gewicht installiert, wie es in Bélidors Werk empfohlen wird. Hier hatten Boumann und Heintze eigenständig oder auf Anraten Eulers das Richtige versucht, um die Druckstöße des Pumpwerks abzumindern.

Trotzdem kam, was kommen musste: Bei dem 1750 unternommenen neuen Versuch, Wasser in das Bassin zu pumpen, versagten auch die neu verlegten Holzleitungen. Diesmal schaltete sich Friedrich II. ein. Eine oft kolportierte Geschichte besagt, dass die Strafe aus zwei Schildern bestehen sollte, die zwei in Öl gemalte Esel in natürlicher Größe darstellten, versehen mit der Überschrift »Hollaandse Fonteinen maakers«. Eine inständige Fürbitte konnte das Anbringen der Schilder wohl verhindern, der ›Fontainier‹ Heintze starb jedoch kurze Zeit später, wohl aus Gram. Boumann wurde nach Berlin versetzt.⁴²

Erst nach dem zweiten Versagen der Druckleitung wurde schließlich geplant, Eisengussröhren von neun Zoll Innendurchmesser zu verlegen. Da aber nur die Bleileitungen geringeren Durchmessers zeitnah geliefert werden konnten, wurden diese eingebaut. Die mit Eulers Dimensionierungsvorschlägen erreichbare Leistung der Maschine wurde damit bei Weitem nicht erzielt. Der im Frühjahr 1754 erreichte Erfolg war immerhin, dass die Leitungen dem Druck standhielten und es war durch monatelanges Pumpen gelungen, das Reservoir ausreichend zu füllen. Am Karfreitag 1754 konnte eine Nebenfontäne in der Nähe des ›Marlygartens‹ für eine knappe Stunde zum Springen gebracht werden, anschließend war der Hochbehalter auf dem Ruinenberg leer.⁴³

Auch das Installieren einer zweiten Windmühle am Bornstedter See im gleichen Jahr brachte keinen befriedigenden Erfolg. Als interessantes Kuriosum mag erscheinen, dass der 1754 neu eingestellte Fontänenmeister Johann Valentin Pfannenstiel versuchte, eine Druckleitung in Form einer zunächst abschüssig und dann sehr steil nach oben geführten Leitungsführung zu installieren.⁴⁴ Euler hatte in seinen *Maximen* einen möglichst kurzen Leitungsweg empfohlen – auch wenn er dadurch sehr steil oder sogar senkrecht werden würde.⁴⁵ Dies hatte Pfannenstiel offensichtlich missverstanden; das Druckwerk hätte in diesem Fall unmittelbar am Anfang des steil aufsteigenden Teils der Leitung stehen müssen, um den Leitungsweg kurz zu halten.

⁴² Vgl. Manger 1987 (Anm. 7), S. 97, 99–100; vgl. Artelt 1893 (Anm. 6), S. 10.

⁴³ Vgl. Manger 1987 (Anm. 7), S. 102.

⁴⁴ Ebd., S. 103; Pfannenstiel, Johann Valentin: *Das Wasserwerk zu Sanssouci gerechtfertigt*, 1755, Staatsarchiv Oldenburg, NLA OL Erw 92 Akz. 2012/031 Nr. 99.

⁴⁵ E 208 In: EOO II, 15, S. 203.

Der 1756 ausbrechende Siebenjährige Krieg bereitete dem Missmanagement des Pumpenprojekts schließlich ein Ende.

Eulers mehrfach geäußerte Warnung, bei falscher Auslegung der Maschine und der Rohrleitung werde »kein Tropfen Wasser« in das Reservoir gehoben, vergaß Friedrich II. ihm nicht. Im Jahre 1778 griff er diese Wendung in einem Brief an Voltaire wieder auf, diesmal gegen Euler gerichtet. Dieser hatte 1766 Berlin verlassen, Friedrich II. grollte ihm deswegen nach und schrieb: Das Wasserhebewerk hätte trotz der wissenschaftlichen Berechnungen Eulers »keinen Tropfen Wasser bis auf fünfzig Schritte zum Bassin gehoben. Eitelkeit der Eitelkeiten! Eitelkeit der Mathematik!«⁴⁶

Die Rezeption Leonhard Eulers

Euler brachte die hydraulische Theorie strömender Flüssigkeiten zwischen 1749–1752 mit insgesamt elf Arbeiten in ihre heutige Form und wandte sie »auf die bis ins einzelne gehende Untersuchung einer Reihe von Maschinen an«.⁴⁷ Wie erfolgte die Rezeption dieser Arbeiten – insbesondere in Hinsicht auf praktische Anwendungen?

Wenzeslaus Johann Gustav Karsten ist einer derjenigen Zeitgenossen, die mit Euler im engen Kontakt standen. Die Themen des Austausches waren unter anderem das Prinzip der »lebendigen Kräfte«, aber auch die Schwierigkeit Eulers, seine Werke im Druck zu verbreiten.⁴⁸ Schlaglichtartig geht daraus hervor, wie begrenzt die Rezeption seiner meist auf Französisch oder auf Latein publizierten Arbeiten war. Für die Pumpenberechnung ist dennoch eine direkte Linie der Wissensweitergabe nachzuweisen. Karsten schreibt, er habe »Hrn. Eulers neuere Untersuchungen gebraucht, um den Bélidorschen Vortrag [gemeint ist dessen *Architecture Hydraulique*] zu verbessern« (Abb. 8).⁴⁹ Karsten lobt die »im vorigen Jahr herausgegebene [...] Hydrodynamik Hrn. Hofr. Kästners« der ebenso die Bernoullische und Eulersche Theorie zugrunde liege⁵⁰. Johann Esaias Silberschlag dagegen, einem in dieser Zeit ebenso bekannten Verfasser mechanischer und hydraulischer Arbeiten, wären »die Eulerschen Untersuchungen über die Theorie der Druckwerke wohl nicht bekannt gewesen«, da ihm »die Weite und Länge der Steigrohre

⁴⁶ Koser, Reinhold; Droysen, Hans (Hg.): *Briefwechsel Friedrichs des Grossen mit Voltaire. Dritter Teil. Briefwechsel König Friedrichs 1753–1778*. Leipzig 1911, S. 427.

⁴⁷ Truesdell, Clifford Ambrose: Zur Geschichte des Begriffes »Innerer Druck«. In: Physikalische Blätter Bd. 12 (1956) Nr. 7, S. 323.

⁴⁸ Karsten, Wenzeslaus Johann Gustav: *14 Briefe 1758–1765*. Online abrufbar unter: <http://eulerarchive.maa.org/pages/E8o3.html> (Zugriff: 12.12.2018); E 8o3 – Vierzehn Briefe oder Auszüge aus Briefen von L. Euler an W. J. G. Karsten 1758–1765. S. 338–339.

⁴⁹ Karsten, Wenzeslaus Johann Gustav: *Lehrbegriff der gesamten Mathematik. Fünfter Theil. Die Hydraulik*. Greifswald 1770, Vorrede S. 6; ebd., S. 571.

⁵⁰ Ebd., S. 216.

für völlig gleichgültig sey«.⁵¹ Um 1800 scheinen die Erkenntnisse Eulers dann stärker wahrgenommen zu werden. Im Jahr 1806 werden einige der hydraulischen Arbeiten Eulers von Heinrich Wilhelm Brandes ins Deutsche übersetzt und neu herausgegeben.⁵² Friedrich Gottlieb Busse analysiert die Höllsche Wassersäulenmaschine und benutzt die Begriffe Geschwindigkeitshöhe, Druckhöhe und Widerstandshöhe schon ganz selbstverständlich und nutzt die Praxisnähe der Freiberger Bergakademie, um auf Erfahrungen von Kunstmeistern zurückzugreifen.⁵³ Johann Albert Eytelwein (1764–1849) benutzt ebenso diese Begriffe und das dahinter stehende Konzept der Energiehöhenlinie. Zunehmend wird nun untersucht, welche Energieverluste infolge von Wandrauigkeit, Krümmungen, Klappen, Ventilen, Schiebern usw. auftreten und wie sie möglichst klein gehalten werden können.⁵⁴

Resümee

Die Weiterentwicklung der Bernoullischen Gleichungen für den instationären Fall führten Euler im Fall der Fontänenanlage von Sanssouci dazu, erstmals eine Maschinenanlage – in diesem Fall Kolvendruckpumpen samt Rohrleitung – in ihrer Funktionalität und Leistungsfähigkeit zu optimieren. Physikalisch wurde dabei das Phänomen des Druckstoßes aufgeklärt. Die Wandlung der Begrifflichkeiten von ›Aufwand‹ und ›Nutzen‹ über den ›Effekt‹ und die ›Perfektion‹ einer Maschine in naturwissenschaftlich-technische Begriffe vollzieht sich am Übergang vom 18. zum 19. Jahrhundert vor dem Hintergrund von Erhaltungssätzen und dem Streben nach der Minimierung von Verlusten.⁵⁵ Die heute bekannten Darstellungsformen der Hydraulik entwickeln sich erst nach einer Phase zahlreicher experimenteller Untersuchungen und Anwendungen im Maschinenbau. Erst 1842 – fast 100 Jahre nach den ersten Versuchen – werden die Wasserspiele in Sanssouci durch August Borsig, Ludwig Persius, Moritz Wilhelm Gottgetreu und Adolph Brix realisiert. Das Pumpwerk wird durch eine Dampfmaschine angetrieben, die Rohrleitungen

⁵¹ Ebd., S. 569–571.

⁵² [Euler, Leonhard:] *Die Gesetze des Gleichgewichts und der Bewegung flüssiger Körper, dargestellt von Leonhard Euler, Übersetzt und mit einigen Abänderungen und Zusätzen von H. W. Brandes*. Leipzig 1806.

⁵³ Busse, Friedrich Gottlieb: *Betrachtung der Winterschmidt- und Höll'schen Wassersäulenmaschine nebst Vorschlägen zu ihrer Verbesserung und gelegentlichen Erörterungen über Mechanik und Hydraulik*. Freyberg 1804, S. 39, 114 ff.

⁵⁴ Johann Albert Eytelwein wollte dabei insbesondere die Ergebnisse, die Pierre Louis Du Buat durch Experimente gewonnen hat, aber mit komplizierter Methodik darstellt, zur einfachen Anwendung aufbereiten. Vgl. Eytelwein, Johann Albert: *Handbuch der Mechanik fester Körper und Hydraulik*. Berlin 1801, S. VI, 216–235; vgl. auch Holzer, Stefan M.: *Zweihundert Jahre Soleleitung Reichenhall–Rosenheim*. In: Bautechnik 86 (2009) H. 3, S. 174–175.

⁵⁵ Kurz nach der Beschäftigung mit dem Potsdamer Pumpenwerk entwickelt Euler seine Überlegungen zum Segnerschen Wasserrad und gab Vorschläge zum Bau einer Turbine, die leider in der Entstehungszeit unbeachtet bleiben. Sie wäre mit einem Wirkungsgrad von 71 Prozent modernen Turbinen fast gleichrangig gewesen. Ackeret, Jakob: *Vorrede*, EOO II, 15, S. XLVI–XLVII.

sind aus Gusseisen, die Dimensionierung folgt den Eulerschen Erkenntnissen.⁵⁶ So brachte das Fontänenprojekt Friedrich II. trotz seines hohen Aufwands zwar nicht den von ihm erwarteten ›Effekt‹, wohl aber den unschätzbarsten Nutzen eines bedeutenden Wissenszuwachses.

⁵⁶ Kurz nach 1800 gelang es in Marly, mit einer neuen durchgehenden Druckleitung das Wasser in einem Zug auf die Höhe von 162 Metern zu fördern – nur eines der vierzehn alten Wasserräder war dazu erforderlich (vgl. Ergang 1911 [Anm. 8], S. 144). Adolf Brix hatte die Anlage besichtigt, bevor er 1840 sein »Promemoria« für die neue Pumpenanlage in Potsdam verfasste. Vgl. Brix, Adolf: *Der Fontainenbau in Sanssouci, II. Artikel, theoretischer Theil. Promemoria*. In: Zeitschrift für Bauwesen 2 (1852), S. 375.