

Hydrospeicher mit Adsorbentien

Jakob Hartig

Band 28



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

 FLUID
SYSTEM
TECHNIK

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Hydrospeicher mit Adsorbentien

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Jakob Hartig, M.Sc.

aus Aschaffenburg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Manfred J. Hampe
Tag der Einreichung:	29.06.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	06.10.2021

Darmstadt 2021

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 28

Jakob Hartig

Hydrospeicher mit Adsorbentien

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8561-7

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Hydrospeicher mit Adsorbentien

Zusammenfassung der eingereichten Dissertation von Jakob Hartig

Hydrospeicher sind Bauteile der Hydraulik, an denen das Hydraulikfluid Arbeit verrichten kann. Hierbei wird ein kompressibles Gas im Hydrospeicher verdichtet. Entspannt sich das verdichtete Gas wieder, verrichtet der Hydrospeicher Arbeit am Hydrauliksystem. Thermodynamisch etwas ungenau sind Hydrospeicher also Energiespeicher.

In Nutzfahrzeugen werden Hydrospeicher in hydro-pneumatischen Federbeinen zur Schwingungsisolierung eingesetzt, wobei die Kompression und Expansion zyklisch stattfindet. Wie bei jedem Feder-Masse-System gilt, je niedriger die Federsteifigkeit, desto besser die Isolierung bei gegebener Masse. Die Federsteifigkeit sinkt allerdings mit dem Bauvolumen des Hydrospeichers.

Übersteigt das Produkt aus Volumen und Druck einen Grenzwert sind in der EU-Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU Entwurfs- und Prüfverfahren festgeschrieben, die die Entwicklung und Produktion aufwendiger machen. Folglich gibt es einen Zielkonflikt zwischen einer besseren Schwingungsisolierung sowie kleineren und günstigeren Hydrospeichern. Am Institut für Fluidsystemtechnik entstand die Idee, Hydrospeicher durch das Einbringen hochporöser Adsorbentien wie Aktivkohle, bei gleicher Steifigkeit kleiner bauen zu können. In Abhängigkeit des Drucks lagern sich Gasmoleküle an die Oberfläche der Adsorbentien an und tragen nicht mehr zum Gasdruck bei. Die Steifigkeit der Hydrospeicher sinkt. Allerdings wird bei Adsorption Wärme frei, die insbesondere bei schneller Anregung und damit isentroper Zustandsänderung den Effekt der Steifigkeitsreduktion teilweise wieder aufhebt.

Diese Arbeit beantwortet die Frage, wie groß das Potential zur Bauraumreduktion durch Adsorbentien in hydro-pneumatischen Federbeinen ist. Damit hängt die Frage nach einem adäquaten Modell für Hydrospeicher mit Adsorbentien zusammen.

Aus den Axiomen für Masse und Energie sowie Materialgleichungen werden gewöhnliche Differentialgleichungen hergeleitet, die Hydrospeicher mit Adsorbentien beschreiben. Nach Lösung im Frequenzraum zeigt sich, dass aus den zahlreichen Stoff- und Wärmetransportphänomenen im Hydrospeicher und im Adsorbenskorn der Wärmeübergang zur Umgebung, die Wärmekapazität der Adsorbentien und das Adsorptionsgleichgewicht die größte Rolle spielen.

Ein Vergleich des Modells mit Messungen an einem prototypischen Hydrospeicher mit Adsorbentien zeigt Unterschiede zwischen Modell und Realität, die der Ausbildung dynamischer Temperaturgrenzschichten zugeschrieben werden können. Dieser Ansatz führt auf ein zweites Modell mit partiellen Differentialgleichungen, welches qualitativ mit den Messungen übereinstimmt. Beide in dieser Arbeit entstandene Modelle sind als obere und untere Grenze für die mit Adsorbentien mögliche Steifigkeits- und damit Bauraumreduktion zu verstehen.

Hydrospeicher werden bei Drücken von 30 bar bis einigen hundert bar betrieben. Da Adsorption mit steigendem Druck schlechter wird, zeigt sich für den unteren Grenzwert eine mögliche Bauraumreduktion von 13 Prozent. Bei hohen Drücken von mehreren hundert bar zeigt sich hingegen eine Bauraumerhöhung. Verglichen mit anderen Maßnahmen zur Steifigkeitsreduktion hat ein Einsatz von Adsorbentien in Hydrospeichern daher nur eingeschränkt Vorteile. Die Modelle und Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich jedoch uneingeschränkt in verwandten Bereichen der Technik verwenden. Luftfedern, die ihre Federwirkung durch Gas bei einem deutlich geringeren Druck als Hydrospeicher erhalten, könnten beim Einsatz von Adsorbentien mindestens 20 Prozent kleiner gebaut werden.

Hydraulic accumulators with adsorbents

Summary of the submitted dissertation by Jakob Hartig

Hydraulic accumulators are hydraulic components on which the hydraulic fluid can perform work by compressing the gas contained in the accumulator. As soon as the compressed gas relaxes, the hydraulic accumulator performs work on the hydraulic fluid. Albeit somewhat imprecise, hydraulic accumulators are therefore energy storage systems.

In commercial vehicles, hydraulic accumulators are used in hydro-pneumatic suspension struts for vibration isolation. The compression and expansion described at the beginning takes place periodically. As with any spring-mass system, the lower the spring stiffness, the better the isolation for a given mass. However, the spring stiffness decreases with the construction volume of the hydraulic accumulator.

As pressure vessels, hydraulic accumulators are subject to the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU in the European Union, which specifies design and test procedures. If the product of volume and pressure exceeds various limit values, further procedures are added that make development and production more complex. However, better vibration isolation and smaller, cheaper hydraulic accumulators are mutually exclusive.

At the Chair of Fluid Systems, therefore, the idea arose to incorporate highly porous adsorbents such as activated carbon, to reduce the volume of the accumulator without changing its stiffness. In pressure-dependent adsorption, gas molecules adhere to the surface of the adsorbents and thus no longer contribute to the system pressure. The stiffness of the hydraulic accumulators decreases. However, heat is released during adsorption, which partially cancels out the effect of stiffness reduction, especially in the case of rapid excitation and thus isentropic change of state.

In this work, the question is answered as to how large the potential is for design space reduction by adsorbents in hydraulic accumulators. Related to this is the question of how to adequately model hydraulic accumulators with adsorbents.

From the axioms for mass and energy as well as material equations, ordinary differential equations were derived which describe hydraulic accumulators with adsorbents. The solution in frequency space shows that from the numerous mass and heat transport phenomena in the hydraulic accumulator and the adsorbent bead, the heat transfer to the environment, the heat capacity of the adsorbents and the adsorption equilibrium play the most important role.

Comparison of the model with measurements on a prototypical hydraulic accumulator with adsorbents reveals differences between the model and reality that can be attributed to the formation of dynamic temperature boundary layers. This approach leads to a second model with partial differential equations, which qualitatively agrees with the measurements. Both models developed in this work should be understood as upper and lower bounds on the stiffness and hence design space reductions possible with adsorbents.

Hydraulic accumulators are operated at pressures from 30 bar to several hundred bar. Since adsorption gets weaker with increasing pressure, a possible installation space reduction of 13 percent is shown for the lower limit. For high pressures of several hundred bar, on the other hand, an increase in stiffness is shown. Compared with other measures for stiffness reduction, the use of adsorbents in hydraulic accumulators therefore has no advantages. However, the models and results of this work can be used without restriction in related areas of engineering. Air springs, which get their spring effect from gas at a much lower pressure than hydraulic accumulators, could be at least 20 percent smaller when adsorbents are used.

Vorwort des Herausgebers

Funktion und Qualität von Gasspeichern

In der Produktentwicklung unterscheiden wir zwischen Funktion und Qualität. Hydrospeicher und Luftfedern in Fahrwerksanwendungen sind Bauteile, die zwei Funktionen erfüllen, nämlich (i) Energie speichern und (ii) statische Last abstützen. In der Schwingungstechnik ist die statische Last zumeist gleich der Systeminduktivität, sofern zwischen Speicher und Last kein Getriebe vorgesehen ist, d.h. schwere Masse und träge Masse sind gleich. Durch die Kapazität, den Speicher, und die Induktivität, die Masse, ist die Eigenfrequenz bestimmt. Menschen sind vergleichsweise unempfindlich gegenüber Schwingungszyklen von etwa einer Sekunde Dauer. Die Eigenschwingungszeit unseres Gleichgewichtsorgans ist länger, Bauchschwingungen dauern länger. Daher wird die Resonanz von Personenfahrzeugen so gewählt, dass die Anregung von Bauch und Ohr möglichst nicht verstärkt wird.

Vorteilhaft (und interessant) ist, dass bei einer Luftfeder - wie bei einem Pendel - die Systemeigenfrequenz unabhängig von der statischen Last ist. Die Eigenschwingungsdauer ist schon aus Dimensionsgründen proportional der Wurzel der Federhöhe h geteilt durch die Massenkraft der Schwere g . Dies führt dazu, dass die Federn von Nutzfahrzeugen, Personenkraftwagen oder Schienenfahrzeugen alle eine Höhe von ca. 35 cm haben und zwar unabhängig vom Federdurchmesser und der Beladung:

$$\Omega\tau \rightarrow \infty : n \rightarrow \gamma, \text{ d.h. } h = n \frac{g}{(2\pi f)^2} \approx 35 \text{ cm.}$$

Hierbei ist n der Polytropenexponent. In den allermeisten technisch relevanten Systemen ist das Produkt aus Anregungsfrequenz Ω und thermischer Relaxationszeit τ deutlich größer als eins, sodass der asymptotische Grenzfall $\Omega\tau \rightarrow \infty : n \rightarrow \gamma$ gilt. Bei einer zunächst hypothetisch isothermen Luftfeder gilt der Grenzfall $\Omega\tau \rightarrow 0 : n \rightarrow 1$. Der Speicher, d.h. die Feder hat dann nur noch eine Höhe von 25 cm. Das Einsparpotential an Bauraum ist also enorm. Bei einer vollständig „isothermisierten“ Feder ist das Gas immer im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung. Dies kann nur dadurch realisiert werden, indem die Wärmeaustauschfläche dramatisch vergrößert wird, so dass die Wärmeleitung vom Gas zum Festkörper den Wettbewerb mit der Speicherung der inneren Energie in den Gasmolekülen bei der technisch (menschlich) relevanten Frequenz „gewinnt“. Allein poröse Materialien zeigen solch eine große Oberfläche. Wenn sich zudem noch Gasmoleküle an der Oberfläche bei Druckanstieg adsorbieren und bei Drucksenkung desorbieren können, kann eine weitere Reduktion der Federhöhe erreicht werden. Damit

sind die zwei physikalischen Effekte genannt, nämlich Wärmeleitung und Adsorption, die Herr Hartig modelliert, validiert und diskutiert hat, immer mit dem Ziel den Bauraum und damit die Höhe h zu reduzieren.

Bauraumreduktion ist eine Qualitätsverbesserung bei gleicher Funktion. Es lohnt sich auch im Zuge der Arbeit von Herrn Hartig die Qualität technischer Systeme zu reflektieren. Qualität hat immer drei Dimensionen, nämlich erstens den Aufwand, zweitens die Verfügbarkeit und drittens die Akzeptabilität. Letztere wird durch Konformität (formale Qualität) mit Normen, so z.B. mit den Anforderungen an Druckbehälter gesteigert.

In der Diskussion von Funktion sowie den drei Qualitätsdimensionen hat die Volumenreduktion von Gasspeichern durch die Nutzung bisher wenig beachteter physikalischer Effekte zwei Auswirkungen. Zum einen wird der Aufwand gemessen in notwendigem Bauraum für eine spezifizierte Funktion reduziert. Denken wir zum anderen an die formale Qualität, so können in der Investitionsgüterindustrie Zertifizierungskosten für Druckspeicher entfallen: Die Druckgeräterichtlinie muss in der Investitionsgüterindustrie erst bei einem Volumen >1 l oder bei einer Energie >25 bar l beachtet werden. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“ stand als Idee zu Beginn der dritten Förderperiode die physikalischen Effekte Adsorption und/oder thermische Energiespeicherung zu nutzen, um bei gleicher Funktion die Qualität der Funktionserfüllung zu erhöhen, indem das notwendige Volumen für den Druckspeicher reduziert wird.

„Alle Modelle sind falsch, manche sind nützlich“

so der Statistiker George Box. Zu Beginn der Arbeit von Herrn Hartig standen zwei axiomatische Modelle, alle sind an der TU Darmstadt und während meiner Industrietätigkeit in den vergangenen Jahren entstanden: erstens ein 1D-Modell für ein generisches pneumatisches System bestehend aus zwei unendlich ausgedehnten Platten, deren Abstand harmonisch verändert wird und zweitens ein 0D-Modell (Modell mit konzentrierten Parametern) für pneumatische Systeme. Das 0D-Modell wurde um ein Adsorptionsmodell erweitert, wobei die Abhängigkeit der Adsorption von der Temperatur unberücksichtigt blieb. Dieses Modell war Ausgangspunkt des DFG-Projektes im Rahmen des SFB 805, das Herr Hartig bearbeitete. Was war der Nutzen der bestehenden Modelle?

1. Herr Hartig konnte argumentieren, dass das Ignorieren der Temperaturabhängigkeit zu einem Artefakt führt, der bei Bauteilmessungen so nicht auftaucht: Bei Druckanstieg kommt es zur Adsorption und damit wird

Bindungsenergie frei. Dadurch steigen die Temperatur und in der Folge der Druck solange, bis im zeitlichen Mittel ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung eingestellt ist. Als Folge wächst nach dem vorhandenen (falschen) Modell vermeintlich die Steifigkeit über die Steifigkeit eines adiabaten Gasvolumens ohne Adsorbens. Herr Hartig zeigt in seiner Arbeit, dass der gegenteilige und in der Tat erwünschte Effekt der Steifigkeitsabsenkung erst eintritt, wenn die Temperaturabhängigkeit der Adsorption berücksichtigt wird.

2. Herr Hartig konnte sowohl das 0D als auch das 1D-Modell physikalisch konsistent erweitern, um Adsorption und thermische Speicherung zu integrieren.

Die Historie der Arbeiten zu pneumatischen Speichern am Fachgebiet Fluidsystemtechnik, die mit der hier vorliegenden Arbeit von Herrn Hartig einen schönen Meilenstein erreicht hat, zeigte die Fallstricke bei der Erstellung von Modellen, auf die schon Francis Bacon, der Vordenker der wissenschaftlichen Methode, in seinem Buch *Neues Organon* im Jahr 1620 hinweist: Falsche wissenschaftliche Schlüsse entstehen, so Bacon, wenn Menschen mehr Ordnung und Regelmäßigkeit in Systemen wahrnehmen, als tatsächlich vorhanden ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Menschen ihren vorgefassten Meinungen über die Dinge folgen. Das was Bacon vor 400 Jahren kritisch anmerkt, hat der persisch-arabische Mathematiker, Optiker und Astronom Abu Ali al-Hasan ibn al-Haitham, im Westen als Alhazan bekannt (* um 965 in Basra; † 1039 oder 1040 in Kairo) kritisch angemerkt:

„Wer die Wahrheit sucht, geht nicht so vor, dass er die Schriften der Vorgänger studiert und sich dabei leichthin der guten Meinung überlässt, die er von ihnen hat. Der Wahrheitssucher misstraut vielmehr seiner angestammten Meinung. Er stützt sich ausschließlich auf sein Verständnis der Texte, indem er den Kriterien der Logik folgt, nicht den Aussagen von Autoren, die ja Menschen sind, zu deren Wesen Fehler und Mängel gehören. Wer wissenschaftliche Werke studiert, muss, wenn er die Wahrheit erkennen will, sich selbst zum Widersacher all dessen machen, was er liest. Er muss Texte und Erläuterungen genauestens überprüfen und von allen Seiten und unter allen Aspekten in Frage stellen. Sich selbst aber betrachte er ebenfalls kritisch bei diesem Prozess, damit er weder zu streng noch zu nachsichtig urteile. Folgt er diesem Weg, so offenbaren sich ihm die Wahrheiten, und mögliche Unzulänglichkeiten und Unklarheiten in den Werken seiner Vorgänger treten zutage.“,

vgl. Museum für Geschichte der Wissenschaft und Technik im Islam, Istanbul. Die von Alhazan geforderte kritische Denkweise hat Herr Hartig mustergültig umgesetzt, indem er meine Modelle „auseinandergenommen“, die Teile verbessert, zusammengesetzt und validiert hat. Wie Herr Hartig in seiner Arbeit, Kap. 4.4, komme ich nun zum Zweck der Modelle.

„... was bei der Betrachtung als Ursache gilt, das gilt bei der Ausführung als Regel“

so wieder Francis Bacon in Neues Organon. Buch 1, Art. 3, 1620. Für Ingenieure haben Modelle immer einen Zweck. In der Tat bestimmt der Zweck das Modell im Wesen. Die heute zuweilen vorherrschende Suche nach „Digitalen Zwillingen“, die „Alles“ zu beschreiben vermögen, ist naiv. Das Zitat zeigt, dass Bacon den Zweck immer im Blick hatte, wofür er durch die Frankfurter Herren Horkheimer und Adorno dreihundert Jahre später kritisiert wurde. Wir als Darmstädter Ingenieure können Bacon aber uneingeschränkt verehren und lassen uns dabei nicht durch Frankfurter Philosophen stören. So hat auch Herr Hartig den Zweck seines Modells im Blick, nämlich Parameter so zu bestimmen, dass die Steifigkeit des Speichers minimal wird.

In der Tat ist der Nutzen von axiomatischen Modellen die Produktentwicklung effizient, effektiv und nachvollziehbar zu machen. Herrn Hartig gelingt dies auf vorbildliche Weise, insbesondere bei der modellbasierten Materialentwicklung. Anstatt den kompletten Frequenzgang eines Materials oder Druckspeichers zu betrachten, Abbildung 4.2, konzentriert sich Herr Hartig auf die technische relevante Asymptote der dynamischen Steifigkeit. Für den Fall, dass die Adsorption viel schneller geschieht als die thermische Relaxation des Gases zur Umgebung und für den Fall, dass die thermische Relaxation des Gases zum Adsorbens viel schneller geschieht als die Relaxation des Gases zur Umgebung, ist die Steifigkeit nur noch von vier dimensionslosen Produkten abhängig, wobei der Isentropenexponent schon durch die Wahl des Gases bestimmt ist. Dabei sind klimaschädliche Gase, die früher diskutiert und eingesetzt wurden, heute glücklicherweise keine Option.

Herr Hartig zeigt, dass in dem vorgegebene Parameterraum, abhängig vom Betriebsdruck, globale oder lokale Optima zu finden sind. Dadurch ist die Entwicklungsrichtung für die Materialentwicklung vorgegeben. Diese findet derzeit in einem DFG-Nachfolgeprojekt statt.

Ich komme nun zum experimentellen Teil der Arbeit von Herrn Hartig. Archimedes „wird aus der Akademie ausgeschlossen mit der Begründung er habe Wissenschaft mit Materie vermengt. Sein Vergehen bestand darin, dass er das Auftriebsgesetz durch Versuche zu bestätigen sich bemühte“ so der Mechanik-Professor Kurt Magnus in seinem Aufsatz „Vom Wandel unserer Auffassung

der Technischen Mechanik“; Ernst Becker, Gedächtniskolloquium 1985, Bd. 28, THD Schriftenreihe Wissenschaft und Technik. D.h. wir Ingenieure haben nicht nur Bacon als Vorbild, sondern auch Archimedes und später Galilei. Spekulative Modelle müssen experimentell validiert werden, etwas was Aristoteles verwerflich empfand. Herr Hartig macht sich wie Archimedes die Finger mit Aktivkohle schmutzig und zwar bei den Messungen an einem modifizierten Serienspeicher. Das Adsorptionsverhalten der Kombination von Gas und Adsorbens bestimmt er mittels gravimetrischen Adsorptionsmessungen in Kooperation mit dem Fachbereich Chemie der TU Darmstadt. Die erreichten Steifigkeitsabsenkungen bleiben etwas hinter den Erwartungen aus dem Modell zurück. Herr Hartig argumentiert dies mit Temperaturgrenzschichten im Druckspeicher. Um dies zu bestätigen, erweitert er das 1D-Speicher-Modell um Stoff- und Wärmetransport zum Adsorbens. Die Arbeit von Herrn Hartig ist aus Ingenieurssicht und physischer Sicht lesenswert. Sie bildet die Grundlage für zukünftige Materialentwicklung.

Darmstadt, im Oktober 2021
Peter Pelz

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt im Rahmen der Bearbeitung des Teilprojekts C9 des Sonderforschungsbereichs (SFB) 805 „*Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus*“. Ich möchte im Folgenden allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, meinen Dank aussprechen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz danke ich für die Bereitstellung des interessanten Themas, das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten bei der Gestaltung meiner Forschung. Nicht zuletzt danke ich auch für die Möglichkeit, abseits des eigenen Themas forschen zu können.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred J. Hampe bin ich für die freundliche Übernahme des Koreferats und die wichtigen Impulse, insbesondere zu den verfahrenstechnischen Themen, sehr dankbar.

Ich möchte auch Herrn Prof. Dr. Jörg J. Schneider und vor allem Herrn Daniel Deckenbach für die Messungen der Adsorptionsisothermen danken.

Forschung lebt von Diskussionen und so danke ich allen Kolleginnen und Kollegen für den Austausch. Insbesondere danke ich meinen ehemaligen Studenten und jetzigen Kollegen Manuel Rexer und Benedict Depp, die mit ihren Abschlussarbeiten das Thema entscheidend vorangebracht haben und wertvolle Anmerkungen zu dieser Arbeit hatten. Darüber hinaus möchte ich Herrn Dr.-Ing. John Friesen und Philipp Wetterich für die kritische Durchsicht dieser Arbeit und die wichtigen Anregungen und Hinweise danken.

Den Studierenden Sissy Yaunan, Aron Hartmann, Luis Hill, Katharina Henn und Nils Poth danke ich für das Engagement und den Einsatz im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten, Hiwi-Tätigkeiten und Gruppenarbeiten.

Der wichtigste Dank gilt nicht zuletzt meiner Partnerin Julia für das professionelle Lektorat und ohne deren Rückhalt und Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, im Juni 2021
Jakob Hartig

*Unabhängig von Allem und Allen, allein mit dem ihm
vorschwebenden Bild des herzustellenden Dinges, steht es Homo
faber frei, es wirklich hervorzubringen; und wiederum allein,
konfrontiert mit dem Resultat seiner Tätigkeit, kann er entscheiden,
ob das Werk seiner Hände der Vorstellung seines Geistes
entspricht, und ist frei, wenn es ihm nicht gefällt, es zu zerstören.*

Hannah Arendt, *Denken ohne Geländer: Texte und Briefe*, [3]

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Steifigkeit von Hydrospeichern	5
2.1	Übertragungsfunktion eines Gasvolumens	8
2.2	Bauraumreduktion von Hydrospeichern	12
3	Stand der Technik zur Adsorption	17
3.1	Technische Adsorbentien	18
3.2	Adsorptionsgleichgewicht	19
3.3	Kinetik der Adsorption	25
4	Modellbildung	27
4.1	Modell	28
4.2	Entdimensionierung und Linearisierung	31
4.3	Diskussion	34
4.4	Grenzbetrachtungen des Übertragungsverhaltens	36
4.5	Einfluss der Parameter	38
4.6	Parametrierung unter Beachtung des Systemdrucks	40
4.7	Fazit zur Modellbildung	45
5	Experimente	47
5.1	Prüfstand, Prüfobjekt und Ablauf der Messungen	47
5.2	Untersuchte Materialien	52
5.3	Entdimensionierung der Messdaten	56
5.4	Diskussion des Prüfstands und der Messunsicherheit	57
5.5	Messergebnisse	61
5.6	Fazit zu den Experimenten	63
6	Diskussion	65
6.1	Modellvalidierung	66
6.2	Einfluss von Temperaturgrenzschichten	70
6.3	Modell unter Berücksichtigung von Grenzschichten	73
6.4	Fazit zur Diskussion	81
7	Zusammenfassung und Ausblick	83
7.1	Zusammenfassung	83
7.2	Ausblick	85
	Literatur	94

A	Modell	95
A.1	Übertragungsfunktion des vollständigen Modells	95
A.2	Parametrierung der Modelle	96
	Relaxationszeiten des Gasvolumens	96
	Verwendete Parameter	97
B	Experiment	99
B.1	Auflistung der Sensoren	99
B.2	Hydraulikschaltplan	99

Symbolverzeichnis

Die Symbole der ersten Spalte werden in der zweiten Spalte beschrieben. Die dritte Spalte, wenn vorhanden, gibt die Dimension als Monom mit den Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T), Temperatur (Θ) und Stoffmenge (N).

Dimensionsbehaftete Größen:

Symbol	Beschreibung	Dimension
α	Wärmeübergangskoeffizient	$M T^{-3} \Theta^{-1}$
A	Fläche des Gasvolumens	L^2
a	Aktivität	1
β	Konstante der Adsorptionsisotherme nach Tóth	1
c	spezifische Wärmekapazität	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
c_v	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
D	Diffusionskoeffizient	$L^2 T^{-1}$
d	Durchmesser	L
η	Scherviskosität	$M L^{-1} T^{-1}$
η_D	Druckzähigkeit	$M L^{-1} T^{-1}$
E	innere Energie	$M L^2 T^{-2}$
F	Kraft	$M L T^{-2}$
F	Helmholtzsche freie Energie	$M L^2 T^{-2}$
f	Frequenz	T^{-1}
g	molare freie Enthalpie, chemisches Potential	$M L^2 T^{-2} N^{-1}$
γ	Isentropenexponent c_p/c_v	1
H'	Henry-Konstante der Adsorption	$M^{-1} L T^{-2}$
H, H_0	Konstante der Adsorptionsisotherme nach Tóth	$M^{-1} L T^{-2}$
$\mathcal{H}$	Nachgiebigkeit	$M^{-1} L T^{-2}$
h	molare Enthalpie	$M L^2 T^{-2} N^{-1}$
h	Höhe	L
$-h_{\text{ads}}$	isostere Wärme der Adsorption	$M L^2 T^{-2} N^{-1}$
i	imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$	1

k	Steifigkeit eines Gasvolumens	$M L^{-4} T^{-2}$
k_B	Boltzmann-Konstante	$M L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
k_s	kinetische Konstante des Linear-Driving-Force Modells	T^{-1}
L	Arbeit	$M L^2 T^{-2}$
l	Länge	L
λ	Wärmeleitfähigkeit	$M L T^{-3} \Theta^{-1}$
λ	freie Weglänge	L
m	Masse	M
$\dot{m}$	Massenstrom	$M T^{-1}$
M	molare Masse	$M N^{-1}$
n	Stoffmenge	N
$\dot{n}$	Stoffstrom	$T^{-1} N$
ν	molares Volumen	$L^3 N^{-1}$
Ω	aufgeprägte Kreisfrequenz	T^{-1}
p	Gasdruck	$M L^{-1} T^{-2}$
p_u	Umgebungsdruck	$M L^{-1} T^{-2}$
q	Stoffmenge adsorbierter Moleküle pro Trockengewicht der Adsorbentien	$M^{-1} N$
Q	Wärme	$M L^2 T^{-2}$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$M L^2 T^{-3}$
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	$M T^{-3}$
R	spezifische Gaskonstante	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
r	Radius, Partikelradius	L
ϱ	Dichte	$L^{-3} M$
S	Entropie	$M L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
s	molare Entropie	$M L^2 T^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$
T	Temperatur	Θ
t	Zeit	T
τ	thermische Relaxationszeit	T
u	Geschwindigkeit	$L T^{-1}$
V	Volumen	L^3
$\dot{V}$	Volumenstrom	$L^3 T^{-1}$
x	Stoffmengenanteil, dimensionsloser Molenbruch	1
X_f	Formfaktor eines Signals	1
z	Koordinate	L

Dimensionslose Größen:

Symbol	Beschreibung
$Bi := Nu \frac{\lambda}{\lambda_s}$	Biotzahl
$C^+ := \frac{m_s c_s}{c_v (V_1 - V_s) \varrho_1}$	diml. Wärmekapazitätsverhältnis
$E_A^+ := \frac{-h_{\text{ads}}(\gamma - 1)}{MRT_1}$	diml. Adsorptionswärme
$H^+ := \frac{p_1 m_s M}{(V_1 - V_s) \varrho_1} \frac{\partial q(p, T_s)}{\partial p}$	diml. Steigung der Adsorptionsisotherme
$k^+ := \left \frac{\hat{p}(V_1 - V_s)}{p_1 \hat{V}} \right $	dimensionslose Steifigkeit des Gasvolumens
$Kn := \lambda/d$	Knudsenzahl
$Nu := \frac{\alpha(V_1 - V_s)/A}{\lambda}$	Nusseltzahl
$Pe := \frac{\Omega(V_1 - V_s)^2}{A^2 \lambda / \varrho_1 c_p}$	Pécletzahl
$\hat{Pr} := \frac{4}{3} \frac{4\gamma}{9\gamma - 5}$	Prandtlzahl
$\delta := \frac{k_s \varrho_1 (V_1 - V_s) c_v}{\alpha A}$	diml. Stoffübergangsfrequenz
$\kappa := \frac{\sqrt{\gamma RT_1} h_1}{\lambda / \varrho_1 c_p}$	diml. Plattenabstand
$\varphi := \frac{V_1 - V_s}{V_1}$	Porosität, Hohlraumvolumen
$\mu := \frac{\alpha A}{\alpha_s A_s}$	Relaxationszeitverhältnis
$\Omega^+ := \frac{\Omega \varrho_1 (V_1 - V_s) c_v}{\alpha A}$	diml. Frequenz

Indices:

Index	Beschreibung
0	Vorfüllzustand
1	Lastzustand
ads	adsorbiert, wird bei Adsorption frei
ad	Adsorbatphase
exc	Exzess(adsorption)
g	Gasphase
konv	konventioneller (Hydrospeicher)
l	flüssig
lokal	lokal
max	maximal
min	minimal
o	Öl
opt	optimal
pore	Pore
s	Festkörper
u	Umgebung

Diakritische Zeichen:

Zeichen	Beschreibung
$\circ_*$	Standardzustand, Gleichgewichtszustand
$\circ^+$	dimensionslose Größe
$\circ^{\circ}$	örtlicher Mittelwert
$\circ^{\circ}$	Schwingungsgröße um Mittelwert
$\circ^{\circ}$	komplexe Amplitude

Abkürzungen:**Kürzel Bedeutung**

AVR	Mittelwert
diml.	dimensionslos(es)
ODE	gewöhnliche Differentialgleichungen
PDE	partielle Differentialgleichungen
RMS	quadratischer Mittelwert
WÜ	Wärmeübergang

Sonstiges:

Gemäß den Vorgaben des Instituts für Fluidsystemtechnik wird als Dezimaltrennzeichen der Punkt (.) verwendet. Auf Tausendertrennzeichen wird verzichtet.

Alle angegebenen Drücke sind absolut.