

**U N I K A S S E L**  
**V E R S I T Ä T**

Fachbereich Maschinenbau

Institut für Produktionstechnik und Logistik



Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse

Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

## **Titel der Arbeit**

**Untertitel**

### **Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science

von

Vorname Nachname

Tag.Monat.Jahr

# Masterarbeit

## Titel der Arbeit

Angefertigt von Vorname Nachname

Matrikelnummer Matrikelnummer

Studiengang Studiengang

Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse

Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Zweitprüfer Zweitprüfer

Betreuer Erstbetreuer

## **Kurzzusammenfassung**

Kurzzusammenfassung der vorliegenden Arbeit

## **Abstract**

Short summary on specific aspects of the topic

# Vereinbarung

zwischen Vorname Nachname, geboren am Tag.Monat.Jahr  
Matr.-Nr. Matrikelnummer

und dem Institut für Produktionstechnik und Logistik  
Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse  
Prof. Dr-Ing. Jens Hesselbach

wird folgende Vereinbarung getroffen:

Geschlecht Vorname Nachname ist zum Thema „ Titel der Arbeit“ im Rahmen seiner Masterarbeit am IPL tätig.

- Der Student verpflichtet sich, gegenüber Dritten Stillschweigen über wissenschaftliche Ergebnisse und Betriebsgeheimnisse zu bewahren.
- Alle an der Hochschule überlassenen Unterlagen sind nach Abschluss der Untersuchungen inklusive aller Kopien unverzüglich an den Betreuer vom IPL zurückzugeben.
- Die Unterlagen sind in jedem Fall vor dem Zugriff unbefugter Personen zu schützen. Eine Überlassung an Dritte - auch auszugsweise - ist nicht erlaubt.
- Das IPL behält sich alle Rechte zur exklusiven Nutzung der Arbeit vor.

---

Vorname Nachname

---

Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

## Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig durchgeführt und verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und sämtliche Stellen, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe. Desgleichen gilt für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen oder Gleichungen.

---

Vorname Nachname

---

Ort, Datum

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Kapitel1</b>	<b>3</b>
2.1 Lippenbekenntnis oder Zukunftsmodell . . . . .	3
<b>3 Grundlagen und Rahmenbedingungen</b>	<b>5</b>
3.1 Begriffe . . . . .	5
3.2 Thermodynamik . . . . .	8
<b>4 Kapitel3</b>	<b>9</b>
<b>5 Kapitel4</b>	<b>10</b>
<b>6 Kapitel5</b>	<b>11</b>
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>12</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Schrifttum</b>	<b>X</b>
<b>Anhang</b>	<b>XI</b>
<b>8 Weitere Abbildungen</b>	<b>XI</b>

# Nomenklatur

## Abkürzungen und Akronyme

Symbol	Beschreibung
--------	--------------

p	Druck
---	-------

T	Temperatur
---	------------

# 1 Einleitung

Vorwörter sind so ähnlich wie Bedienungsanleitungen – meistens werden sie nicht gelesen, besonders von Technikern. Trotzdem wollen wir es nutzen, um die Hintergründe und die Zielsetzung dieses Buches zu erläutern. Eigentlich wollten wir zwei Bücher schreiben. Eines für die Studierenden mit Grundlagen und einigen Beispielen und das zweite für die Praktiker mit wenig Einführung und vielen Beispielen. Wie Sie sehen, haben wir uns anders entschieden. Der Grund resultiert aus Erfahrungen mit unserer Lehrveranstaltung „Messen von Stoff- und Energieströmen“. Dort haben wir Studierende und Unternehmensvertreter in Weiterbildungsangeboten gemischt. Das Ergebnis war ermutigend. Die Studierenden profitierten von den vielen Beispielen der Praktiker. Diese wiederum fanden (wieder) Gefallen am studentischen Lernen. Das Buch ist so geschrieben, dass jedes Kapitel, ja nahezu jeder Abschnitt, alleinstehend gelesen werden kann. Insofern schauen Sie ins Inhaltsverzeichnis und lesen Sie (zuerst), was Sie am meisten interessiert. Erwartungsgemäß werden sich die Praktiker zunächst auf Kapitel 5 und 6 konzentrieren. Wir haben dort jedoch Verweise auf die Grundlagen Kapitel 2 bis 4 hinterlegt. Insgeheim hoffen wir, dass sie doch irgendwann die Neugier packt, wie wir zu den dort aufgeführten Ergebnissen gekommen sind. Dann haben wir unser Ziel erreicht. Dies gilt umgekehrt auch für die Studenten, die hoffentlich neugierig genug werden, was sie mit dem Wissen aus Kapitel 2 bis 4 denn nun anfangen können.

Sie finden in dem Buch nicht nur Wissen und Erfahrungen aus unserer eigenen Arbeit. Es gibt eine Vielzahl von fleißigen Kollegen und Unternehmensvertretern, die ebenfalls spannende Ergebnisse erarbeitet haben. An dieser Stelle herzlichen Dank an diese für die Veröffentlichung der Ergebnisse. Wir geben auch gerne zu, dass die Grundlagen zu Thermodynamik und Wärmeübertragung in Kapitel 2 nicht wir erarbeitet haben. Allerdings haben wir einige Anwendungsbeispiele integriert, damit es nicht ganz so trocken ist. Ergänzend haben wir uns bemüht, die Inhalte durch einen etwas lockeren Sprachstil nicht zu akademisch zu vermitteln. Die Hardliner der Wissenschaft mögen es uns daher verzeihen, dass die Wortwahl nicht immer einem streng universitären Anspruch genügt.

Das Buch entstand als Teamarbeit mit den Mitarbeitern meines Fachgebietes an der Universität Kassel und Vertretern der Limón GmbH als spin-off-Unternehmen. Die Grafiken und die Textgestaltung erstellten die fleißigen Designerinnen von formkonfekt. Mein Dank geht auch an das Lektorat Maschinenbau im Vieweg + Teubner Verlag, das kompetent, engagiert und mit vielen Anregungen den Buchentstehungsprozess begleitet hat. Ohne die Unterstützung aller genannten Beteiligten wäre das Buch heute noch nicht fertig. Und ohne die finanzielle Unterstützung des NATURpur Institutes der HSE AG aus Darmstadt wären wir auch nicht in der Lage gewesen, das Material so schick aufzuarbeiten. Allen sei an dieser Stelle nochmals herzlich gedankt.

Denjenigen, die dieses Vorwort doch gelesen haben, wünschen wir nun viel Spaß beim Lesen und anschließend viel Erfolg bei der Anwendung – sei es in der Lehre oder im Beruf (Hesselbach 2012, S. V).

# 2 Kapitel1

blablabla

## 2.1 Lippenbekenntnis oder Zukunftsmodell

Mit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls hat sich die Bundesregierung verpflichtet, die Treibhausgasemissionen test bis 2020 um 40% gegenüber 1990 zu vermindern. Dieses Klimaschutzziel ist nur zu erreichen, wenn neben dem Ausbau der Erneuerbaren Energien auch die Energieeffizienz in allen Bereichen deutlich gesteigert wird. So soll beispielsweise die Energieproduktivität in Deutschland nach dem Willen der Politik im Vergleich zu 1990 bis zum Jahr 2020 verdoppelt werden, d. h. im Klartext: Es steht nur noch die Hälfte an Energie für die Herstellung der gleichen Produkte zur Verfügung. Trotz dieser ambitionierten Zielsetzung erscheinen die Maßnahmen zu deren Unterstützung im Vergleich zur Förderung der Erneuerbaren Energien über das EEG eher dürftig und unstrukturiert. Es ist daher nicht weiter verwunderlich, dass die Realität dem gesteckten Ziel deutlich hinterher hinkt. Statt der jährlich notwendigen 3 % Steigerung erreichen wir aktuell noch nicht einmal mehr die Hälfte, im summarischen Mittel seit 1990 ca. 1,7 % (siehe Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: xxx

Die Gründe sind vielschichtig und in den einzelnen Bereichen der Gesellschaft auch unterschiedlich. Betrachtet man Effizienzmaßnahmen unter Marketinggesichtspunkten, so ist

das Thema umgangssprachlich formuliert leider absolut unsexy. Effizienz klingt nach weniger, riecht also nach Verzicht, schmeckt wie Styropor und ist meist einfach unsichtbar. Da bieten die Erneuerbaren Energien deutlich mehr fotogenes Potenzial für Politiker, um sich zu präsentieren. Zudem fällt auch eine politische Polarisierung und damit Differenzierung deutlich leichter. Das schon historische Spannungsfeld „Atomkraft gegen Windkraft“ verdeutlicht dies eindrucksvoll, wobei Letztere bei Hardlinern auch gerne als „Vogelschrederanlagen“ bezeichnet werden.

Diese Möglichkeiten für die Öffentlichkeitsarbeit bieten Effizienzmaßnahmen nicht. Ihre Notwendigkeit ist zudem über alle Parteien hinweg weitgehend unumstritten. Auf den ersten Blick erscheint eine solch breite Mehrheit im Hinblick auf eine langfristige und kontinuierliche politische Unterstützung von Vorteil. Faktisch führt dies jedoch eher dazu, dass der Energieeffizienz nicht die Aufmerksamkeit und Unterstützung zuteil wird, die ihrem Anteil zum Erreichen der Klimaschutzziele entspricht. Wo ist das Pendant zum EEG?

Ungeachtet dieses politischen Nachteils gibt es eine Reihe von weiteren Umständen, welche die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen behindern oder verzögern. Dabei muss allerdings zwischen den einzelnen gesellschaftlichen Bereichen differenziert werden (siehe Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2: xxx

## 3 Grundlagen und Rahmenbedingungen

Man muss wissen, was man tut, war eine der Grundvoraussetzungen. Die Grundkenntnisse über die unterschiedlichen Produktionsprozesse setzen wir voraus, schließlich ist das Buch für Produktionstechniker und diejenigen, die es werden wollen, konzipiert. Aber wir benötigen auch einige Begrifflichkeiten und formelmäßige Zusammenhänge aus der Thermodynamik, der Wärmeübertragung, der Strömungslehre und der Elektrotechnik. Ohne dieses Handwerkszeug ist es nicht möglich, Energieströme zu messen, zu berechnen oder über Modelle abzubilden. Genau dies war ja aber eine weitere Grundvoraussetzung für erfolgreiches Energiemanagement: die solide Datenbasis.

Aber keine Angst, wir werden in diesem Buch nicht die Grundlagen der Thermodynamik in voller Breite abhandeln, hierzu sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (Baehr et al. 2008; Iben et al. 1999; Schmidt et al. 1975). Es geht einerseits darum, die wichtigsten Berechnungsgrundlagen wieder parat zu haben und andererseits zu wissen, wie Energieströme formelmäßig bilanziert und bestimmt werden können.

### 3.1 Begriffe

Gemäß der Physik ist Energie die Menge an Arbeit, die ein physikalisches System verrichten kann. Sie kann weder verbraucht noch erzeugt werden. Wenn wir also in einem Produktionsbetrieb einen mittleren Leistungsbedarf von 1 MW Strom haben und keine Kühlanlagen oder die gefertigten Produkte die Wärme nach außen abführen, dann entspricht dies letztlich einer elektrischen 1 MW-Heizung. Im Winter spart dies Heizwärme, ist also nicht gänzlich verloren, führt aber im Sommer ohne Klimatisierung schnell zu Temperaturen am Arbeitsplatz von über 40 °C.

Energie lässt sich jedoch von einer Form in eine andere wandeln. Je nach Energie und Wandlungsprozess verläuft die Umwandlung verlustbehaftet. Dabei verlieren wir aber keine Energie im streng physikalischen Sinne, sondern verkleinern den nutzbaren Anteil im

Hinblick auf die Verwendung. Insbesondere bei der Umwandlung von Wärme in andere Energieformen geht davon aufgrund der thermodynamischen Zusammenhänge viel verloren. Hier eine Auswahl möglicher Energieformen:

- potenzielle Energie (Lageenergie oder Spannenergie bei Federn)
- kinetische Energie (translatorisch, rotatorisch, Schwingungen)
- chemische Energie
- Kernenergie
- Druck-Volumen-Energie
- elektrische Energie
- thermische Energie (Wärme)

.....  
.....  
.....

Der maximal in Arbeit umwandelbare Teil der Wärme ist nicht vom Arbeitsstoff abhängig und berechnet sich zu (Labuhn et al. 2009, S. 153ff):

$$|W|_{max} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_0}\right) \cdot Q_0 \quad (3.1)$$

.....  
.....  
.....

### **Thermodynamische Systeme**

Für thermodynamische Betrachtungen muss zunächst ein Bilanzraum definiert werden. Dieser ist

1. abgeschlossen, wenn es keine Wechselwirkung mit der Umgebung gibt;
2. geschlossen, wenn nur Arbeit und/oder Wärme, aber keine Masse übertragen werden;
3. offen, wenn ein Stoff- und Energieaustausch mit der Umgebung möglich ist;
4. adiabat, wenn keine thermische Energie über die Bilanzgrenze ausgetauscht wird.

Als Beispiel werden in den Lehrbüchern gerne Kolben und Zylinder verwendet. In Produktionssystemen können dies jedoch vollständige Maschinen, Produktionsbereiche oder auch die gesamte Fabrik sein. Hier ist es wichtig, die richtigen Bilanzgrenzen zu definieren. Am besten benutzt man zur Darstellung einfach Rechtecke oder Kreise und zeichnet die relevanten Energieströme ein.

Zur physikalischen Beschreibung des Zustandes von thermodynamischen Systemen werden bevorzugt Zustandsgrößen verwendet. Diese sind unabhängig vom Weg, auf dem das System einen Zustand erreicht hat. Das reduziert den Aufwand oftmals auf eine quasistationäre, also zeitunabhängige Bilanzierung eines Endzustandes (2) im Vergleich zu einem Anfangszustand (1), um einen Prozess zu beschreiben. Äußere Zustandsgrößen wie z. B. Lagekoordinaten oder die Geschwindigkeit beschreiben den mechanischen Zustand eines Systems. Innere Zustandsgrößen wiederum beschreiben den makroskopischen Zustand der Materie. Diese lassen sich einteilen in thermische Zustandsgrößen (z. B. Druck, Temperatur, Volumen) und energetische Zustandsgrößen (z. B. Innere Energie, Enthalpie, Entropie). Intensive Zustandsgrößen wie Druck ( $p$ ) und Temperatur ( $T$ ) sind dabei von der Systemmasse unabhängig.

## 3.2 Thermodynamik

Die nachfolgende Tabelle gibt für ideale Gase die wichtigsten Größen für die jeweiligen Zustandsänderungen an. Sie können insbesondere zur Beurteilung von Prozessen mit Druckluft verwendet werden.

**Tabelle 3.1:** Formelmäßige Zusammenhänge bei Zustandsänderungen von Luft (Iben et al. 1999, S. 79)

Energiestrom	Formelmäßige Basis	Zustands- und Prozessgrößen	Bemerkung
Elektrische Leistung	$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$U(t), I(t)$	In einem Messgerät integriert
Druckluft	$P_{DL} = \dot{V} \cdot p_{DL}$	$\dot{V}, p_{DL}$	Bei Normalbedingungen
Hydraulik	$P_{Hy} = \dot{V} \cdot p_{Hy}$	$\dot{V}, p_{Hy}$	-
....	....	....	....

**Tabelle 3.2:** Formelmäßige Zusammenhänge bei Zustandsänderungen von Luft (Iben et al. 1999, S. 79)

Energiestrom	Formelmäßige Basis	Zustands- und Prozessgrößen	Bemerkung
Elektrische Leistung	$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$U(t), I(t)$	In einem Messgerät integriert
Druckluft	$P_{DL} = \dot{V} \cdot p_{DL}$	$\dot{V}, p_{DL}$	Bei Normalbedingungen
Hydraulik	$P_{Hy} = \dot{V} \cdot p_{Hy}$	$\dot{V}, p_{Hy}$	-
....	....	....	....

## 4 Kapitel3

# 5 Kapitel4

## **6 Kapitel5**

## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

# Abbildungsverzeichnis

2.1	xxx . . . . .	3
2.2	xxx . . . . .	4

# Tabellenverzeichnis

3.1	Formelmäßige Zusammenhänge bei Zustandsänderungen von Luft (Iben et al. 1999, S. 79) . . . . .	8
3.2	Formelmäßige Zusammenhänge bei Zustandsänderungen von Luft (Iben et al. 1999, S. 79) . . . . .	8

# Schrifttum

Baehr, Hans Dieter, Karl Stephan (2008). *Wärme- und Stoffübertragung*. 6. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer. 789 S. ISBN: 978-3-540-87688-5.

Hesselbach, Jens (2012). *Energie- und klimateffiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele*. ger. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner (GWV). ISBN: 978-3-8348-0448-8.

Iben, Hans Karl, Jürgen Schmidt (1999). *Starthilfe Thermodynamik*. ger. Stuttgart und Leipzig: Teubner. ISBN: 3519002620.

Labuhn, Dirk, Oliver Romberg (2009). *Keine Panik vor Thermodynamik! Erfolg und Spaß im klassischen "Dickbrettbohrerfach" des Ingenieurstudiums*. ger. 4., aktualisierte Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. ISBN: 9783834806451.

Schmidt, Ernst, Karl Stephan, Franz Mayinger (1975). *Technische Thermodynamik. Grundlagen und Anwendungen Band 1 Einstoffsysteme*. ger. 11. neubearbeiteten Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer. ISBN: 9783662102657.

# 8 Weitere Abbildungen

Platz für alles was nicht so recht in Arbeit passt.