



Wilfried Sommer

## Physik 10. Klasse

Statik – Kinematik – Dynamik

## Physics 10th Grade

Statics – Kinematics – Dynamics

GESTALTEN + ENTDECKEN **Physik**



Pädagogische  
Forschungsstelle  
Kassel

Zu der vorliegenden Handreichung zum Physikunterricht der 10. Klasse an Waldorfschulen stehen auf der Webseite der Pädagogischen Forschungsstelle beim Bund der Freien Waldorfschulen ergänzende Materialien zur Verfügung. Sie können unter <https://www.forschung-waldorf.de/service/downloadbereich/ergaenzungen-zu-publikationen/> kostenfrei heruntergeladen werden.

Additional material to this handbook for physics lessons in 10th grade Waldorf schools is available on the website of the Pedagogical Research Center of the Federation of Waldorf Schools. They can be downloaded free of charge from <https://www.forschung-waldorf.de/service/downloadbereich/ergaenzungen-zu-publikationen/>

# Inhalt

## **1 Hinweise zum Rahmen des Heftes**

## **2 Zum Mechanik-Epochenunterricht der 10. Klasse**

2.1 Vorwissen aus den Physikepochen der 7. und 8. Klasse

2.2 Zum Kontrast der Physikepochen der 9. und 10. Klasse

2.3 Themen und Spezifika der Epoche

## **3 Einstieg in die Physikepoche**

3.1 Heftführung

3.2 Einleitung

## **Teil I Statik**

### **4 Einstiegsversuche Statik**

4.1 Zur Rolle leiblichen Lernens bei der Einführung der Kraft

4.2 Unterrichtspraktische Hinweise

4.3 Weitere Einstiegsversuche

4.4 Didaktische Entscheidungen: Einheit Newton und *free-body diagram*

### **5 Gleichgewicht dreier Kräfte**

5.1 Vom eingebundenen zum abgelösten Versuch

5.2 Didaktische Bemerkungen

5.3 Übungsaufgaben zum Gleichgewicht dreier Kräfte

5.4 Die resultierende Kraft als Perspektivenwechsel

### **6 Elastische Verformungen**

## **7 Vom Gleichgewicht dreier Kräfte zur Komponentenerlegung**

7.1 Schiefe Ebene

7.2 Übungsaufgaben zur schiefen Eben

## **8 Fachwerke**

8.1 Kräne

8.2 Übungsaufgaben zu Kränen

8.3 Fachwerkbrücken

## **9 Der selbsttragende Bogen zwischen Dreiecks- und Rundbogen**

### **Teil II Kinematik**

## **10 Eindimensionale Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit und konstanter Beschleunigung**

10.1 Didaktischer Kontext

10.2 Einführung der Geschwindigkeit

10.3 Einführung der Beschleunigung

10.4 Übungsaufgaben zur Geschwindigkeit und Beschleunigung

## **11 Der freie Fall und das Fallgesetz**

11.1 Didaktisches Anliegen

11.2 Vorschläge für den Unterrichtsgang

11.3 Übungsaufgaben zum freien Fall

11.4 Üben im Unterricht

11.5 Exkurs I: Gehen als Resonanzbeziehung zur Erde

11.6 Exkurs II: Die Gravitationswechselwirkung im Kontext der Aggregatzustände

## **12 Überlagerung von Bewegungen - waagrecht und schräger Wurf**

12.1 Didaktische Zwischenbilanz

12.2 Waagrechter Wurf

12.3 Schräger Wurf

### **Teil III Dynamik**

#### **13 Einführung der Newton'schen Axiome**

13.1 Vorbemerkung zum Epochengang

13.2 Didaktische Vorbemerkung

13.3 Thematisierung des zweiten Newton'schen Axioms

13.4 Einführung der Gewichtskraft

13.5 Zusammenfassung: die Newton'schen Axiome

13.6 Übungsaufgaben

#### **14 Einführung der Energie**

14.1 Einführung der Arbeit

14.2 Einführung der potenziellen und kinetischen Energie

14.3 Übungsaufgaben

14.4 Ausblick: Definition der Leistung

### **Teil IV Anhang**

#### **15 Zum Kraftbegriff**

15.1 Thematisierung des Kraftbegriffs im Umfeld der ersten Waldorfschule

15.2 Steiners Kraftbegriff in seinem Kommentar zu Goethes Naturwissenschaftlichen Schriften

#### **16 Vorschlag für eine Epochengliederung**

#### **17 Hinweise**

17.1 Hinweise zu den verwendeten Lehrmitteln

17.2 Vorlage Gefährdungsbeurteilung

#### **18 Literatur**

# Content

## **1 Notes on the structure of the booklet**

## **2 Regarding the mechanics main lesson of the 10th grade**

2.1 Previous knowledge from the physics main lessons of the 7th and 8th classes

2.2 Comparison of the physics main lessons of the 9th and 10th classes

2.3 Themes and concrete details of the main lesson

## **3 Getting started with the physics main lesson**

3.1 Remarks on the main lesson book

3.2 Introduction

## **Part I Statics**

### **4 Beginning experiments in statics**

4.1 The role of physical learning in introducing statics

4.2 Practical tips for teaching

4.3 Further introductory experiments

4.4 Didactic decisions: The unit *newton* and the *free-body diagram*

### **5 Balance of three forces**

5.1 From immersed to detached experimentation

5.2 Didactic remarks

5.3 Exercises on the balance of three forces

5.4 The resultant force as a change of perspective

### **6 Elastic deformations**

## **7 From the equilibrium of three forces to decomposing into components**

7.1 The inclined plane

7.2 Exercises on the inclined plane

## **8 Trusses**

8.1 Cranes

8.2 Exercises on cranes

8.3 Timbered bridges

## **9 The self-supporting arch between triangular and round arch**

### **Part II Kinematics**

## **10 One-dimensional motions with constant velocity and constant acceleration**

10.1 Didactic context

10.2 Introduction to velocity

10.3 Introduction to acceleration

10.4 Exercises on velocity and acceleration

## **11 Free fall and the law of falling bodies**

11.1 Didactic remarks

11.2 Suggestions for the course of instruction

11.3 Exercises for free fall

11.4 Practice in class

11.5 Excursion I: Walking as a resonant relationship with the earth

11.6 Excursion II: The gravitational interaction in the context of states of matter

## **12 Superposition of movements - horizontal and slanted throwing**

12.1 Didactic review

12.2 Horizontal throw

12.3 Slanted throw

## **Part III Dynamics**

### **13 Introduction to Newton's laws**

13.1 Dependencies on the foregoing

13.2 Didactic preliminaries

13.3 Newton's Second Law

13.4 Introduction to gravitational force

13.5 Summary: Newton's laws

13.6 Exercises

### **14 Introduction to energy**

14.1 Introduction to work

14.2 Introduction to potential and kinetic energy

14.3 Exercises

14.4 Outlook: Definition of power

## **Part IV Appendix**

### **15 The concept of force**

15.1 Discussion of the concept of force in the context of the first Waldorf school

15.2 Steiner's concept of force in his commentary on Goethe's scientific writings

### **16 Proposal for organization of the main lesson**

### **17 Notes**

17.1 Information on the teaching materials used

17.2 Template for risk assessment

### **18 Bibliography**

# 1 Hinweise zum Rahmen des Heftes

Das vorliegende Heft ist eine Handreichung zum Physikunterricht der 10. Klasse an Waldorfschulen. Dort werden in der Regel ausgewählte Aspekte der Mechanik in einem drei- bis vierwöchigen Epochenunterricht mit täglich ca. zwei Unterrichtsstunden behandelt (Richter 2016, S. 426 ff.). Der vorliegende Band fasst Unterrichtsvorschläge und didaktische Hinweise zusammen, die sich als Angelpunkte bewährt haben, um zentrale Themen der Statik, Kinematik und Dynamik im Epochenunterricht aufzuschließen.

Die Entwicklung der Handreichung wurde von der Pädagogischen Forschungsstelle beim Bund der Freien Waldorfschulen am Standort Kassel getragen. Viele didaktische Hinweise beziehen sich auf den phänomenologischen Unterrichtsansatz der Waldorfpädagogik. Er wird, wie auch die Phasengliederung des Epochenunterrichtes in der Waldorfpädagogik, als bekannt vorausgesetzt.

Erläuterungen zu der allgemeindidaktischen Dimension dieses Ansatzes finden sich im *Handbuch Waldorfpädagogik und Erziehungswissenschaft - Standortbestimmung und Entwicklungsperspektiven* (Sommer 2016), seine physikdidaktische Spezifizierung im *Handbuch Oberstufenunterricht an Waldorfschulen* (Sommer 2018).

Die Unterrichtsvorschläge und didaktischen Hinweise greifen einerseits Vorarbeiten auf, die mit dem Fokus eines phänomenologischen Unterrichtsansatzes in den letzten 40 Jahren entwickelt und im Umfeld der Pädagogischen Forschungsstelle diskutiert wurden, u. a. von Hermann von Baravalle (1993), Manfred von Mackensen (2000), Georg

Maier (2004), Heinz-Christian Ohlendorf und Florian Theilmann (2006). Andererseits nehmen sie auf physikdidaktische Forschungsarbeiten zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Themenfeld Mechanik Bezug, beispielsweise von Walter Jung, Horst Schecker, Hartmut Wiesner, Thomas Wilhelm und Rita Wodzinski (Müller/Wodzinski/ Hopf 2011; Schecker/Wilhelm/Hopf/Duit 2018). Beide Forschungsansätze sind in den hier vorgestellten Vorschlag für den Mechanik-Epochenunterricht in der 10. Klasse eingeflossen.

# 1 Notes on the structure of the booklet

This booklet is a handbook for physics instruction in the 10th grade at Waldorf schools. There, selected aspects of mechanics are usually dealt with in a three- to four-week main lesson with about two hours of instruction per day (Richter 2016, p. 426 ff.). The present volume gathers together teaching suggestions and didactic tips that have proved their effectiveness in unlocking central themes of statics, kinematics and dynamics in main lesson teaching.

The development of the handbook was supported by the Pedagogical Research Center of the Federation of Waldorf Schools in Kassel. Many of the didactic references refer to the phenomenological teaching approach of Waldorf Education. The reader is assumed to be familiar with this as well as the temporal three-phase structure of main lesson teaching in Waldorf education.

Explanations of the general didactic foundation of this approach can be found in Sommer 2010 & 2014, its physical-didactic specification in Sommer 2019.

On the one hand, the teaching suggestions and didactic advice build upon previous work focused on a phenomenological approach to teaching, developed and discussed over the past 40 years in and around the Pedagogical Research Center, e. g. by Hermann von Baravalle (1993), Manfred von Mackensen (2000), Georg Maier (2004), Heinz-Christian Ohlendorf and Florian Theilmann (2006). On the other hand, the contents also cite research in physics didactics concerned with students' mental pictures and learning difficulties in the field of mechanics, for example by Walter Jung, Horst Schecker, Hartmut Wiesner, Thomas Wilhelm and Rita Wodzinski (Müller/Wodzinski/Hopf 2011; Schecker/Wilhelm/Hopf/Duit 2018). Both research approaches have been incorporated into the suggestions for mechanics main lesson teaching in the 10th grade presented here.

## **2 Zum Mechanik-Epochenunterricht der 10. Klasse**

### **2.1 Vorwissen aus den Physikepochen der 7. und 8. Klasse**

Das Thema Mechanik wird im Physikunterricht der Waldorfschulen in der Regel erstmalig in der 7. Klasse unterrichtet (Richter 2016, S. 420 ff.). Ein Unterrichtsvorschlag von Mackensen (2005/2016, S. 123 ff.) beginnt beispielsweise mit ein- und zweiarmigen Hebeln, geht dann zum Hebelgesetz über und behandelt anschließend Wellhebel und Wellrad. Es schließen sich lose und feste Rolle als Hinführung zum Flaschenzug an.

Mackensen (2005/2016, S. 124) beschreitet einen originellen didaktischen Weg vom verbogenen Hebebalken zum Hebelgesetz, welchen er in seinem Beitrag *Der Hebel – wie Partizipation am menschlichen Wissen erzielt werden kann* im Detail ausgeführt und begründet hat (Buck/Mackensen 2006, S. 35 – 54). Von der Form des verbogenen Hebebalkens wird dort über die räumliche Verteilung der Druck- und Zugspannungen die Verbindung zu Kraft und Kraftarm im Hebelgesetz hergestellt.

Der Physikunterricht der 7. Klasse ist lebensnah angesetzt (Richter 2016, S. 420). Viele Lehrer\*innen geben Kräfte in dieser Jahrgangsstufe pragmatisch in der Einheit kg an – an den meisten Waldorfschulen wird die physikalische Einheit Newton für Kräfte erst in der 10. Klasse eingeführt. Auch wird bei Rechnungen zum Hebelgesetz der Umgang mit Einheiten nicht grundsätzlich problematisiert.

In der 8. Klasse schließen sich Hydraulik und Aeromechanik an (Mackensen 2005/2016, S. 165 - 182). Es tritt zu den vielen alltäglichen Erfahrungen, die im Physikunterricht der 7. Klasse thematisiert wurden, jetzt ein mehr technischer Blick hinzu. So werden einfache Zivilisationstechniken besprochen: Wie kann es sein, dass ein Schiff schwimmt? Wie funktioniert die Wasserpumpe, welche heute in vielen Kleingärten zum Einsatz kommt? Wie ein Barometer? - Ziel ist es, dass die Schüler\*innen, angeregt durch den Physikunterricht, die Welt um sich herum als eine technische Zivilisation verstehen lernen (Richter 2016, S. 422).

## **2.2 Zum Kontrast der Physikepochen der 9. und 10. Klasse**

Im Epochenunterricht Physik der 9. Klasse steht die moderne Zivilisation mit ihrer Mobilität und Kommunikationstechnik im Vordergrund. Die Physikepoche hat einen technischen Schwerpunkt. Der von Schulz (2013) entwickelte Unterrichtsgang zur Kommunikationstechnik endet beispielsweise bei der seriellen Datenübertragung. Folgt man seinem Vorschlag und bespricht mit den Schüler\*innen, wie im Zeitmultiplexverfahren mehrere Telefongespräche über eine Leitung übertragen werden können,

## 2 Regarding the mechanics main lesson of the 10th grade

### 2.1 Previous knowledge from the physics main lessons of the 7th and 8th classes

The subject of mechanics is usually handled for the first time in physics classes at Waldorf schools in the 7th grade (D'Aleo/Edelglass 1999, p. 86 ff.). A teaching proposal by Mackensen (1994, p. 51 ff.), for example, begins with single- and double-arm levers, then moves on to the law of the lever and then deals with the »wheel and axle«. This is followed by a free and a fixed pulley as an introduction to the pulley block.

Mackensen (1994, p. 51 f.) takes an original didactic path from the bent lever beam to the law of the lever. By considering the shape of the deformed lifting beam, the spatial distribution of the compressive and tensile stresses revealed there gives the connection to the force and lever arm in the law of the lever.

Physics instruction in the 7th grade is based on real life (Richter 2016, p. 420). Many teachers pragmatically specify forces in this grade with the unit *kilogram* – at most Waldorf schools the physical unit *newton* for forces is only introduced in grade 10. Nor is the use of units taken up in a serious way when calculating the law of the lever.

Hydraulics and aeromechanics follow in the 8th grade (Mackensen 1997, p. 35 – 51). A more technical view is now added to the many everyday experiences that were the subject of physics lessons in 7th grade. Simple technologies

of civilization are discussed: How can it be that a ship floats? How does the water pump, found today in many gardens, work? The aim is that pupils, inspired by physics lessons, learn to understand the world around them as a technical civilization (Richter 2016, p. 422).

## **2.2 Comparison of the physics main lessons of the 9th and 10th classes**

In the physics main lesson in the 9th grade, modern civilization with its mobility and communication technology is the main focus. The physics main lesson has a technical focus. The course on communication technology developed by Schulz (2013) ends, for example, with serial data transmission. If one follows his suggestion and discusses with the pupils how several telephone conversations can be transmitted over one line using the time multiplex method,

»so realisieren die Schüler\*innen meist mit großer Faszination, dass, nachdem Daten digitalisiert wurden, durch intelligente Protokolle über nur wenige Leitungen ganz unterschiedliche Kommunikationsstränge abgewickelt werden. Sie stellen begeistert fest, wie das ›Nadelöhr der Digitalisierung‹ eine gigantische Technik ermöglicht, wird hier doch ein Bezugsnetz sehr intelligenter Verabredungen in ein physikalisches Netzwerk implementiert.

Hier prägt oft die Genialität der Digitaltechnik das Lernklima und mit Freude und Anerkennung konstatieren viele Schüler\*innen, wie intelligent man mit digitalen Daten umgehen und wie geordnet man dabei voranschreiten muss. Das *anything goes* der Digitaltechnik tritt vielen von ihnen verheißungsvoll ins Bewusstsein« (Sommer 2020).

Das korrespondiert des Öfteren mit ihrem pubertären Selbstverständnis, gehen doch viele Schüler\*innen dieses Alters wie selbstverständlich davon aus, dass sie mit ihrer Urteilskraft alles schnell und allgemeingültig intellektuell durchdringen können und danach passioniert vertreten dürfen. Ein »erzieherisches Moment« des Physikunterrichtes der 9. Klasse liegt in einer Kanalisierung eines unmittelbaren und frischen pubertären Erkenntnisoptimismus auf den Erfindungsreichtum, dem unsere Zivilisation ihr hohes technisches Niveau verdankt. Schüler\*innen erfahren so, wie der direkte intellektuelle Zugriff, clever geführt, Berge wie Menschen versetzen und Information vernetzen kann.

Demgegenüber bildet die Physikepoche der 10. Klasse einen deutlichen Kontrast. Dort wird an den grundlegenden Begriffsbildungen der Mechanik thematisiert, wie eine

physikalische Erscheinung, ihre sprachlich präzise Formulierung, ihre symbolische Darstellung und ihre mathematische Behandlung zusammenhängen. »Der Unterricht zielt in diesem Sinne auf starke Koinzidenzerlebnisse« (Richter 2016, S. 426).

In der Statik werden beispielsweise die Versuchssituationen in Lageplänen komprimiert dargestellt, in den zugehörigen Kräfteplänen bilden dann die entsprechenden Kräftegleichgewichte eine geschlossene Vektorkette und von Zeit zu Zeit mag ein *free-body diagram* die gewonnenen Einsichten maßstäblich und übersichtlich zusammenfassen. Anwendungsaufgaben sind nun grafisch im Kräfteplan und mathematisch mit Hilfe der Trigonometrie lösbar. Schüler\*innen lernen so, unterschiedliche Ebenen der physikalischen Beschreibung aufeinander zu beziehen und den Gang von einer gegenständlichen bis zu einer mathematischen Ebene zu überblicken.

In der Kinematik liegt der Fokus hingegen mehr auf der Verbindung einer gegenständlichen mit einer sprachlichen Ebene, wenn sie z. B. zusammenfassend formulieren können: Körper bewegen sich im freien Fall so, dass die pro Zeiteinheit zurückgelegten Wegabschnitte sich wie die ungeraden Zahlen verhalten bzw. die nach ein, zwei usw. Zeiteinheiten zurückgelegten Gesamtwege sich wie die Quadratzahlen verhalten. Sobald die einheitliche Fallbeschleunigung  $g$  ermittelt und kontextualisiert wurde, können Schüler\*innen dann nicht nur in zahlreichen Übungsaufgaben die mathematische Beschreibung des freien Falls anwenden und mit Einheiten in der Physik geläufig umgehen, viel-

»The pupils are usually very fascinated to realize that once data has been digitized, intelligent protocols can be used to handle a wide variety of communication channels over just a few lines. They discover with enthusiasm how the ›bottleneck of digitization‹ makes a vast technology possible, as an abstract network of very intelligent connections is implemented in a physical network.

Here, the ingenuity of digital technology often sets the tone of the learning process, and many students note with joy and appreciation how intelligently one has to handle digital data and with what precision one has to proceed. The »*anything goes*« [i. e., the universality] of digital technology becomes increasingly apparent to many of them« (Sommer 2019).

This correlates well with their pubertal self-image, as many students of this age take it for granted that they can quickly and under all circumstances grasp everything intellectually with their power of judgement and then have the right to speak out passionately about it. An »educational moment« of the physics lessons of the 9th grade lies in channeling this immediate and fresh pubertal optimism in knowledge to the inventiveness to which our civilization owes its high technical level. Pupils thus experience how a direct intellectual approach, cleverly guided, can move mountains as well as people and network information.

The physics main lesson of the 10th grade presents a clear contrast to this. There, in the treatment of the formation of the basic concepts of mechanics, students learn how a physical phenomenon, its linguistically precise formulation, its symbolic representation and its

mathematical treatment are connected. »In this sense, the lessons aim at strongly correlated experiences« (Richter 2016, p. 426).

For example, in statics the experimental set-up is drawn in compressed form in a diagram of the bodily situation. For simplicity, we often refer to this diagram as the form diagram. In the corresponding force diagram, equilibria of forces appear as closed vector loops. A free-body diagram, combining form and force diagrams, may occasionally be helpful to summarize the insights gained, drawn to scale and clearly organized. Applied exercises can then be solved graphically via the force diagram and mathematically with the help of trigonometry. In this way, pupils learn to relate different levels of physical description to each other and to get an overview of the process moving from a real-world setting to a mathematical one.

In kinematics, on the other hand, the focus is more on the connection between a real-world representation and a linguistic one; for example, when they summarize a situation as follows: Bodies move in free fall in such a way that the distances travelled in successive time steps behave like the odd numbers, while the cumulative distances traveled behave like the square numbers. Once the uniform gravitational acceleration  $g$  has been determined and contextualized, students will not only be able to use the mathematical description of free fall in numerous exercises and become familiar with units of physics, mehr wird es ihnen auch möglich, staunend zur Kenntnis zu nehmen, wie einfach und geschlossen dieser Bereich der Physik, zumindest in seiner idealisierten Form ohne Berücksichtigung der Reibung, ist.

In der Dynamik führt die Anwendung des zweiten Newton'schen Axioms (Aktionsprinzip) auf die einheitliche Fallbeschleunigung  $g$ , mit der ganz unterschiedliche Körper zur Erde fallen, zu dem Begriff der Gewichtskraft bzw. Schwerkraft und es wird den Schüler\*innen schließlich

bruchlos einsichtig, warum Gewichtskräfte eine eigene Einheit haben, die verschieden von der der Masse ist.

Es sind sehr grundlegende, auch einfach zu überblickende physikalische Phänomene, die im Vordergrund stehen. Sie können auf ganz verschiedenen Ebenen behandelt und beschrieben werden. In der Zusammenschau wird dadurch immer bemerkenswerter, wie klar und wohlgeordnet sie in Erscheinung treten. Das ist staunenswert. Ein puristisches Denken ergreift formale Strukturen, diese koinzidieren mit grundlegenden mechanischen Erscheinungen. Ein »erzieherisches Moment« der Physikepoche der 10. Klasse liegt in einer Kultivierung des Denkens, das puristische Formen für grundlegende Phänomene findet, ihre staunenswerte Koinzidenz mit den Erscheinungen erkennt und damit realisiert, wie exakt und wohlgeordnet Erscheinung und Denken zusammenkommen können.

## **2.3 Themen und Spezifika der Epoche**

An vielen Waldorfschulen haben sich als Inhalte in der Physikepoche zur Mechanik in der 10. Klasse ausgewählte Themen der Statik, Kinematik und Dynamik etabliert und bewährt (Richter 2016, S. 426 ff.). Im Unterricht zur Statik stehen das dritte Newton'sche Axiom (Reaktionsprinzip) und die Superposition der Kräfte im Zentrum, während bei der Behandlung der Kinematik und der Dynamik auf das erste bzw. zweite Newton'sche Axiom (Trägheits- und Aktionsprinzip) Bezug genommen wird.

Der Physikunterricht der 10. Klasse zur Mechanik ist nur dann bruchlos mit dem der 11. Klasse vernetzt, wenn im Unterricht zur Dynamik insbesondere auch Arbeit und Energie behandelt werden, gelingt es doch nur so, in der 11. Klasse die elektrische Spannung als Quotient von Arbeit und Ladung zeitnah einzuführen und zu besprechen (Sommer 2018, S. 477 f.). Insofern bewähren sich dreiwöchige

Physikepochen zur Mechanik in der 10. Klasse meist nicht, die Themen Arbeit und Energie können - von Ausnahmen abgesehen - nur in vierwöchigen Epochen hinreichend genau thematisiert und in Übungsaufgaben vertieft werden.

Die Reihenfolge Statik - Kinematik - Dynamik ist im Umfeld der Pädagogischen Forschungsstelle viel diskutiert worden und in der vorliegenden Handreichung mit Bedacht gewählt. Dies soll im Folgenden - nach einem Exkurs zu Schülervorstellungen zur physikalischen Größe Kraft - erläutert werden.

but they will also be able to marvel at how simple and self-sufficient this area of physics is, at least in its idealized form without taking friction into account.

In dynamics, the application of Newton's Second Law to the uniform gravitational acceleration  $g$ , with which very different bodies fall to earth, leads to the concept of *gravitational force*, and the students will finally understand immediately why gravitational forces have their own unit, which is different from that of mass.

The focus is on very basic physical phenomena, which are also easy to survey. They can be treated and described on very different levels. In the synopsis it becomes more and more remarkable how clear and well-ordered they appear – quite astonishing actually. Pure thinking expresses itself in formal structures, and these coincide with basic mechanical phenomena. An »educational moment« of the 10th grade physics main lesson lies in a cultivation of thinking which finds exact forms for fundamental phenomena, recognizes their startling coincidence with the appearances and thus comes to know how precisely and harmoniously appearance and thinking can coincide.

## **2.3 Themes and concrete details of the main lesson**

At many Waldorf schools, selected topics of statics, kinematics and dynamics have established themselves through a process of selection as contents in the mechanics main lesson in 10th grade (Richter 2016, p. 426 ff.). In lessons on statics, Newton's Third Law (Law of Action and Reaction) and the superposition of forces are at the center, while the treatment of kinematics and dynamics connects to

Newton's First Law (Law of Inertia) and Second Law, respectively.

The physics lessons in the 10th grade on mechanics are only then seamlessly linked with the physics lessons in the 11th grade if the lessons on dynamics also handle work and energy, since this is the only way to have enough time to introduce and discuss the electric voltage as the quotient of work and charge in the 11th grade (Sommer 2019, p. 33 ff.). In this respect, three-week mechanics main lessons usually do not prove successful in the 10th grade, and the topics of work and energy – with some exceptions – can only be dealt with in sufficient detail in four-week main lessons and deepened in exercises.

The sequence statics – kinematics – dynamics has been much discussed in the environment of the Pedagogical Research Center and has been carefully chosen for the present handbook. This will be explained in the following – after an excursion on pupils' ideas about the physical quantity called *force*.

## **Exkurs: Schülervorstellungen zur Kraft**

Wodzinski gibt in dem von Müller/Wodzinski/Hopf (2011) herausgegebenen Band zu Schülervorstellungen in der Physik mit Bezugnahme auf Jung (Jung/Wiesner/Engelhardt 1981) einen Überblick zu Kraftvorstellungen, welche Schüler\*innen in ihren Beiträgen im Unterricht immer wieder zum Ausdruck bringen. Sie führt für den Kontrast zwischen dem physikalischen Verständnis bzw. der physikalischen Beschreibung von Kräften und den Präkonzepten der Schüler\*innen im Einzelnen aus (S. 110):

»Im physikalischen Verständnis ist Kraft lediglich eine formale Größe zur Beschreibung von Wechselwirkungen. *Jung* [(Jung/Wiesner/Engelhardt 1981)] weist darauf hin, daß es bei Schülerinnen und Schülern durchaus auch Vorstellungen gibt, die der physikalischen Vorstellung nahe kommen und in Richtung auf eine Relation zu interpretieren sind, daß ihnen aber das analytische Begriffswerkzeug fehle, um zu klaren Einordnungen zu kommen. Das führe dazu, dass Kraft zu etwas ›Selbstständigem‹ wird, was neben den Gegenständen existiert. ›So übernehmen die Kräfte die Rolle scholastischer, eine Art Geister, auf die man das Bewirken, das ja rätselhaft bleibt, schieben kann, gerade weil man sie nicht sieht und von ihnen eigentlich nichts weiß. Sie sind die verdinglichten Postulate, ließe sich etwas freundlicher sagen: die Anziehung des Nagels (vom Magneten), daß er in Bewegung gesetzt wird, muß eine *Ursache* haben, das muß einer *machen*. Kräfte sind die verdinglichten Ursachen und die postulierten Täter. Man muß sie erfinden und verdinglichen, weil der Magnet selbst, der ›Gegenstand‹, so sichtbar passiv

herumliegt: Der ist sicher nicht der *Täter!* [...] Kraft im Sinne der Dynamik ist eben *kein* ›Wesen‹, sondern Bestandteil der Beschreibung – einer höchst kunstvollen und künstlichen – einer Relation zwischen Teilen des Systems.« (S. 85).

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, daß man Formulierungen wie ›Kraft ist die Ursache von Bewegungsänderungen.‹ oder ›Die Kraft kann man nicht sehen.‹ möglichst im Unterricht vermeiden sollte, denn sie unterstützen die Vorstellung von Kraft als etwas Substanzartigem eher noch und verdecken den Relationscharakter. Auch Formulierungen von ›wirkenden Kräften‹ werden dem physikalischen Kraftbegriff nicht gerecht. Sie sollten konsequent durch Formulierungen wie ›ein Körper übt auf einen anderen eine Kraft aus‹ ersetzt werden. Die Formulierung hat den Vorteil, daß immer beide Wechselwirkungspartner benannt werden und dadurch auch im Auge bleiben.«

Wodzinski legt mit Bezugnahme auf Jung Kräfte als einen Beschreibungsansatz für Wechselwirkungen fest und grenzt diese deutlich von der philosophischen Position eines metaphysischen Realismus ab, bei dem ein hinter den Wechselwirkungen Seiendes angenommen wird, welches die Potenz habe, die Wechselwirkungen selbst hervorzubringen. Dieser metaphysische Realismus weist weit über die Beschreibung von Wechselwirkungen

## Excursion: Students' mental pictures of force

In the volume on pupils' mental pictures in physics with reference to Jung (Jung/Wiesner/ Engelhardt 1981), edited by Müller/Wodzinski/Hopf (2011), Wodzinski gives an overview of the mental pictures of force that pupils typically express in their classroom contributions. It discusses in detail the contrast between the physical understanding or description of forces and the pupils' preconceptions (p. 110):

»In physical understanding, force is merely a formal quantity for describing interactions. Jung (Jung/Wiesner/Engelhardt 1981) points out that there are also mental pictures that come close to the physical concept and can be interpreted in the direction of a relation, but that the students lack the necessary analytical conceptual tool to arrive at clear distinctions. Consequently, force becomes something ›independent‹ that exists alongside objects. ›In this way, forces take on the role of a kind of ghostly entity on which one can blame the effect, which remains mysterious, precisely because one does not see them and actually knows nothing about them. They are the objectified postulates, it could be more gently phrased as: the attraction of a nail to a magnet, that brings it into motion, must have a *cause*, someone or something has to *do* it. Forces are the reified causes and the postulated perpetrators. They have to be invented and reified, because the magnet itself, the ›object‹, is so visibly passive: It is certainly not the *culprit!* [...] Force in the sense of dynamics is *not a* ›being‹, but part of the description – a highly artistic and

artificial one – of a relation between parts of the system.< (p. 85).

Against this background, it is clear that formulations such as ›force is the cause of changes in movement< or ›force cannot be seen< should be avoided if at all possible, as they tend to support the idea of force as something substantial and obscure the relational character. Even formulations of ›acting forces< do not do justice to the physical concept of force. They should be consistently replaced by formulations like ›one body exerts a force on another body<. The formulation has the advantage that both interaction partners are always named and thus remain in view.«

With reference to Jung, Wodzinski defines forces as an approach to describing interactions and clearly distinguishes them from the philosophical position of metaphysical realism, which assumes that there is something behind the interactions that produces the interactions themselves. This metaphysical realism extends far beyond the description of interactions, and thereby can create a gap between experience and explanation, which hinaus, er kann eine Kluft zwischen der Erfahrung und Erklärung aufbauen, die dann das ganze weitere Verständnis durchzieht. Er ist in vielen Präkonzepten der Schüler\*innen mehr oder weniger offen anzutreffen. – Es wird hier ein weiteres Mal deutlich, wie schnell sich im Physikunterricht strukturell eine Kluft zwischen Erscheinungen und den Konzepten, die als Erklärungen herangezogen und erlebt werden, verfestigen kann.

Im Physikunterricht der Waldorfschulen werden spezifische phänomenologische Zugänge als Ansatz der physikalischen Erkenntnisgewinnung verfolgt, um diese Kluft zu vermeiden. Ihr philosophischer und didaktischer Rahmen ist andernorts referenziert und beschrieben (Sommer 2018,

S. 455 ff.). Damit stellen die von Wodzinski diskutierten Formulierungen auch für den Mechanik-Epochenunterricht der 10. Klasse eine wertvolle Anregung dar. Sie sensibilisieren einerseits für Redewendungen, die gerne verwendet werden, aber die beschriebene Kluft vergrößern, und stellen andererseits Alternativen vor, um die Kluft zu überbrücken.

Viele Lehrkräfte müssen aller Voraussicht nach ihre Sprachgewohnheiten verändern, wenn sie Mechanik in dem hier dargestellten phänomenologischen Zugang unterrichten. Je mehr es ihnen gelingt, konkrete Wechselwirkungen sprachlich exakt zu fassen, ohne Kräfte als »verdinglichte[n] Ursachen« oder »postulierte[n] Täter« (s. o.) zu thematisieren, umso deutlicher wird sich die Koinzidenz von physikalischer Erscheinung und gedanklicher bzw. konzeptioneller Beschreibung in der Kommunikation des Unterrichtes zeigen können.

Der Unterschied zwischen physikalischer Erscheinung und gedanklicher bzw. konzeptioneller Beschreibung tritt in der Statik mit besonderer Klarheit hervor. Hier werden Gleichgewichtsbedingungen untersucht. Im Versuch lasten Gewichte oder es werden Leisten verspannt; insbesondere treten dort Druck- und Zugspannungen auf. Die Bewegungen, welche die Verspannungen einleiten, kommen zur Ruhe. Damit wird der Blick nicht auf die hinführende Dynamik, sondern die Wechselwirkungen gelenkt, welche durch Komponenten des Versuches vermittelt werden, z. B. durch eine metallische Öse, an der drei unter Zug stehende Seile befestigt sind. Die Gleichgewichtsbedingung wird dann im Fortgang des Unterrichts gedanklich als geschlossene Vektorkette beschrieben. Sie kann rein geometrisch in einer maßstäblichen Zeichnung oder mathematisch mit der Trigonometrie weiter untersucht werden.

Die Koinzidenz von einzelnen Komponenten des Versuches, die verspannt in Ruhe sind, und geschlossenen

Vektorketten als gedanklicher bzw. konzeptioneller Beschreibungsansatz für eine Gleichgewichtsbedingung steht im Vordergrund.

Beginnt man die Physikepoche mit der Kinematik und führt dort die Addition bzw. Superposition von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren ein und geht dann zum Aktionsprinzip bzw. zweiten Newton'schen Axiom über, so ergeben sich die Themen der Statik als ein Sonderfall der Dynamik. In dieser Reihenfolge mag es näherliegen, Kräfte als »Ursachen« oder »Täter« aufzufassen, die sich im Falle der Statik eben kompensieren bzw. zur Nettokraft null addieren. Die Koinzidenz von Wechselwirkungen, die mit them pervades all subsequent understanding. It can be found more or less openly in many of the students' existing concepts. - It becomes clear once again here how quickly a structural gap can arise in physics instruction between phenomena and the concepts that are used and experienced as explanations.

To avoid this gap, specific phenomenological approaches are applied in physics lessons at Waldorf schools, as a method for gaining physical knowledge. Their philosophical and didactic framework is referenced and described elsewhere (Sommer 2019, p. 7 ff.) In this sense, the formulations discussed by Wodzinski also provide a valuable stimulus for the mechanics main lesson of the 10th grade. On the one hand, they sensitize students to commonly-used phrases, which widen the gap described, and on the other hand, they present alternatives to bridge the gap.

Many teachers are likely to have to change their language habits when teaching mechanics using the phenomenological approach presented here. The more they are able to grasp concrete interactions linguistically with precision, without addressing forces as »reified causes« or »postulated perpetrators« (see above), the more clearly the coincidence of physical phenomena and mental or

conceptual description will be able to reveal itself in the classroom communication.

The difference between physical appearance and mental or conceptual description is particularly clear in statics. Here, equilibrium conditions are the object of study. In the experiment, weights are loaded on or slats are stretched; in particular, compressive and tensile stresses arise. The movements that give rise to the stresses come to rest. In this way, the focus is not on the dynamics leading up to the equilibrium, but on the interactions mediated by components of the experiment, e. g. a metallic eyelet to which three ropes under tension are attached. In the course of the main lesson, the condition of equilibrium is then conceptually represented as a closed loop of vectors. It can be further examined purely geometrically in a scale drawing or mathematically with trigonometry.

The main feature of this treatment is the coincidence of the individual components of the experiment, all of which are under tension while at rest, and the closed vector loop as a conceptual description of the state of equilibrium.

You can start the physics main lesson with kinematics, introducing the addition or superposition of velocity and acceleration vectors and then moving on to Newton's Second Law. In this approach, statics is handled as a special case of dynamics. When done in this order, the students may be tempted to understand forces as »causes« or »perpetrators«, which in the case of statics cancel each other out, adding together to produce a net force of zero. The coincidence of interactions, that are associated with material tensions, with the corresponding vectorial description might then be experienced as secondary effect. Since this coincidence however is precisely one of the educational goals of the main lesson, we recommend to begin the main lesson with statics.