Dynamik durch Regelkreise verstehen
Ein Thema der Schüler-Ingenieur-Akademie (SIA) [T09]

Hans-Otto Carmesin, Gymnasium Athenaeum, Studienseminar Stade und Universität Bremen; hans-otto.carmesin@t-online.de; http://hans-otto.carmesin.org/

Jürgen Brunßen, Jobelmannschule Stade

DPG-Tagung, Frankfurt 2014

[T09] Deutsche Telekom Stiftung: Jahresbericht 2008/2009. URL: http://www.max-planck-gymnasium.eu/stufen/ing_akademie.pdf

Grundprinzipien der SIA Stade

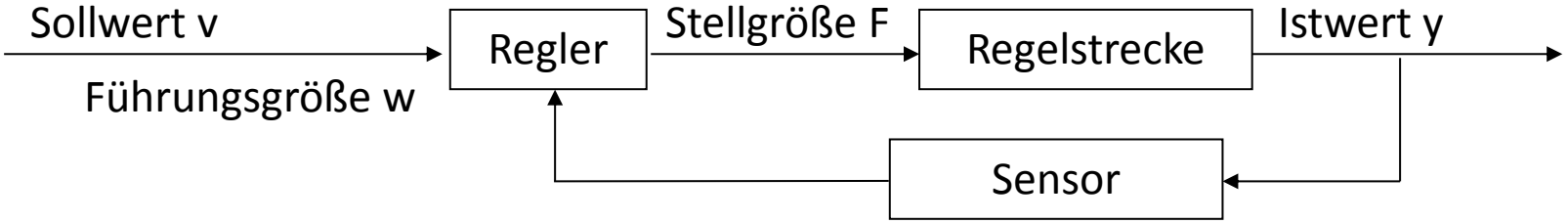
- Ziel: Situatives Lernen an relevanten Kontexten [H09]
- Leute, Einrichtungen
  - Schülerinnen und Schüler
  - Schulen
  - Partner: Hochschulen, Unternehmen
- Physikdidaktisches Grundschema: Problemlösen [H09]
  - **Problemstellung**: Natur- oder Ingenieurwiss. Problem; Semester 1
  - **Problemanalyse**: Physikalische Gesetze; Lösungsmethoden; Sem. 2
  - **Lösung; Sem. 2 Facharbeit**
  - **Sicherung für alle ; Sem. 3**
  - **Reflexion, Verallgemeinerung, Theorie, Kompetenzerlebnis im „Wettkampf“**
    - **Sem. 3 & 4:** Förderung Abi-relevanter Kompetenzen
    - **Breit anwendbares Ingenieurwissen erwächst aus Schülerwissen durch Didaktisierung**
- Progressiver Ablauf im Seminarfach

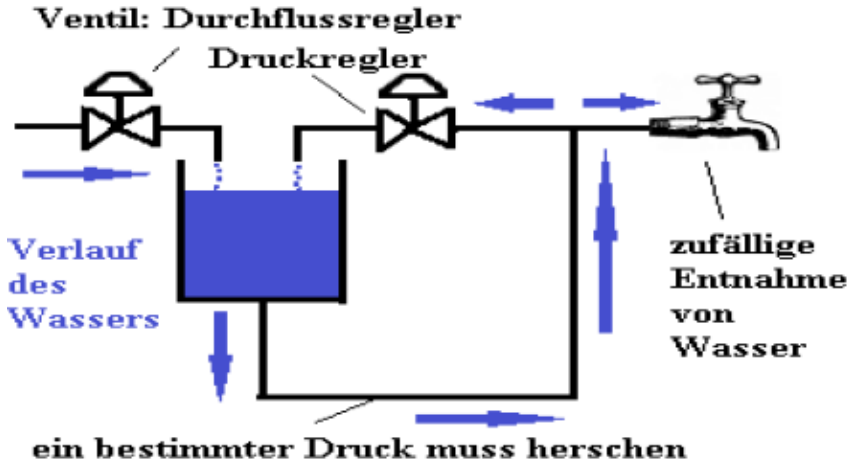
[H09] Hattie, John: Visible Learning, Routledge, London, 2009.

Themenbeispiel: Wie regelt man Dynamik?

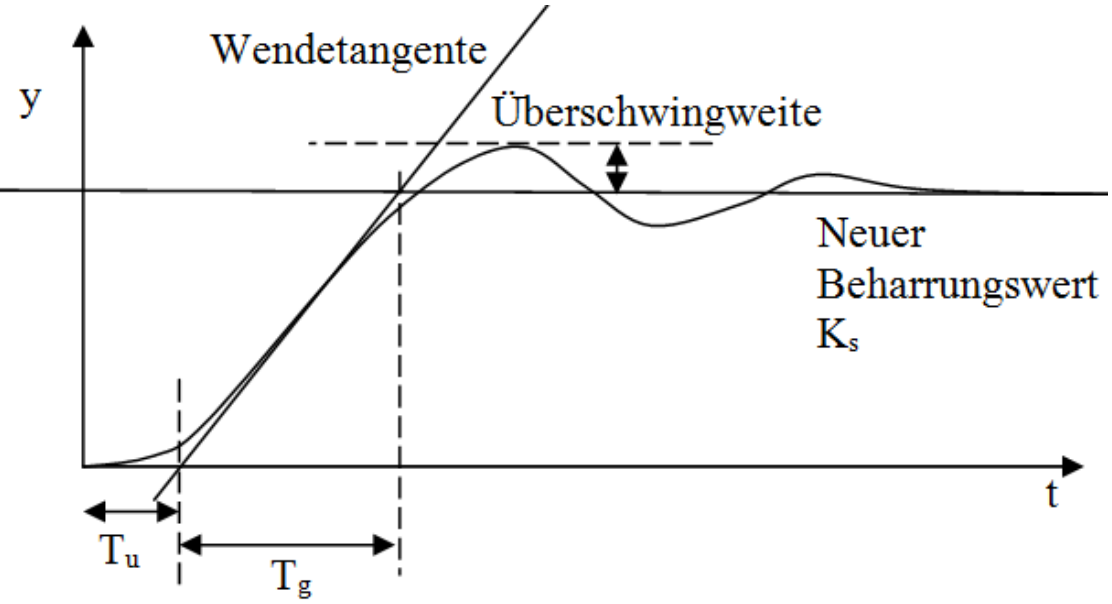
- Zwei von 12 Partnern:
  - Dow Stade
  - Hochschule 21 Buxtehude
- **Problemstellungen**
  - Regelung eines Feuerlöschbehälters
  - Computerbasierte Ventilüberwachung
  - Robotik
  - Automatisierung an einer Modellfabrikationsanlage
- **Problemanalyse**
  - Regelstrecke: Feder-Masse-Pendel
  - P-Regler
  - PD-Regler
  - Auslegungsregeln von Ziegler & Nichols
- **Lösung**: Simulieren, Experimentieren, Reglerauswahl, Reglerauslegung
- **Sicherung** für alle: Ergebnispräsentation
- **Vertiefung**: Aufstellen und Lösen von DGLs, Konstruktionswettkämpfe → Sollwerterreichung

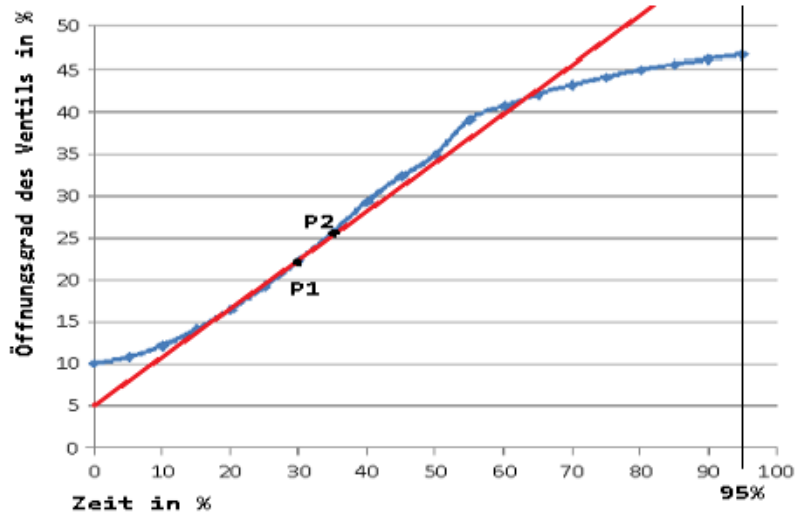
Facharbeit: Simulation eines Löschwasserbehälters



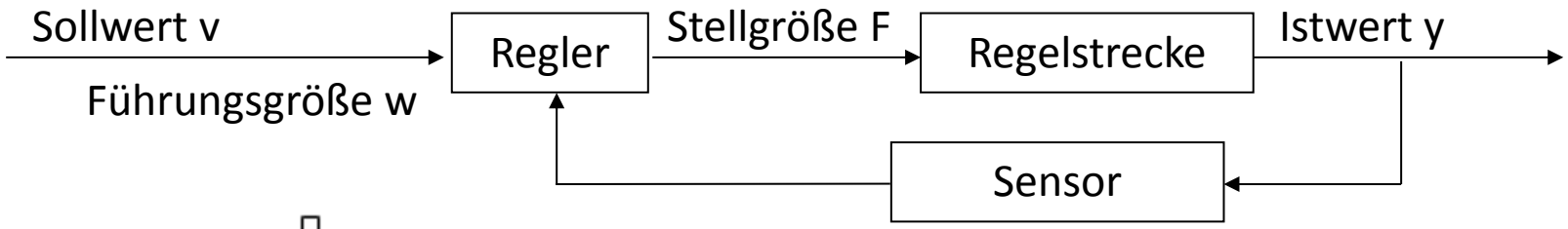


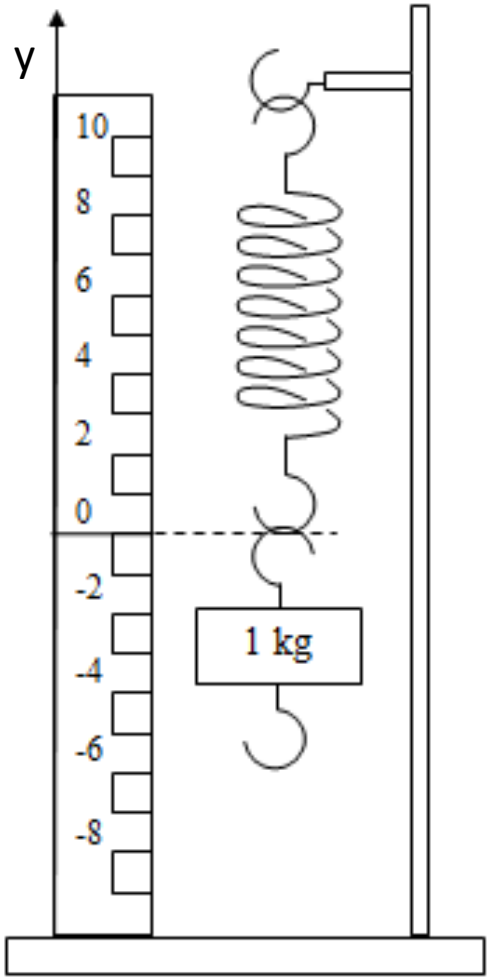
- P-Regler: $F_{Regler} = k_p \cdot (w-y)$
- Sprungantwort
  - Simulation
  - Reglerauslegung nach Nichols und Ziegler: $k_p = T_g / (T_u \cdot K_s)$
- PI-Regler ähnlich





Didaktisierung: Regelstrecke Federpendel



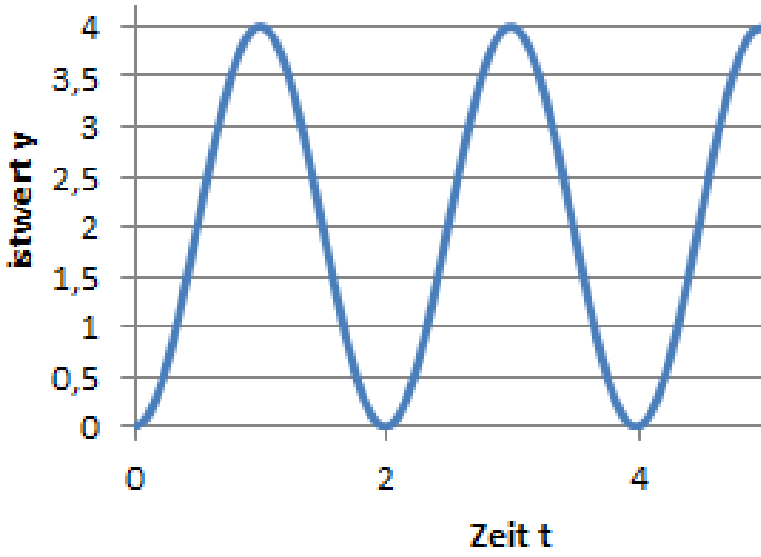


- $F = - D \cdot y = m \cdot y''$ $\quad | : m$
- $y'' = - D/m \cdot y$
- <u>Ansatz</u>: $y = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$
- <u>Einsetzen</u> in DGL:
- $y'' = - A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$
- $- A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) = - A \cdot D/m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ $\quad | : - A \cdot \sin(\omega \cdot t)$
- $\omega^2 = D/m$
- Je nach Zeitnullpunkt → Phase: $y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$
- <u>Harmonische Schwingung</u>

Federpendel mit konstanter Kraft F

- $F - D \cdot y = m \cdot y''$ $\quad | : m$
- $y'' - F/m + D/m \cdot y = 0$
- Ansatz: $y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) + b$
- Einsetzen in DGL:
- $0 = A \cdot [D/m - \omega^2] \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) + [b \cdot D/m - F/m]$
- Beide eckige Klammern gleich null:
- $F/D = b$; $\omega = (D/m)^{0,5}$
- Anfangswerte: $0 = y' = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \rightarrow \varphi = \pi/2$ für $A<0$
- $0 = y \rightarrow A = -F/D$
- $y(t) = -F/D \cdot [\sin(\omega \cdot t + 0{,}5\pi) + 1]$

Kohärente SI-Einheiten
Sprungantwort für m = 1; D = 10; F = 20

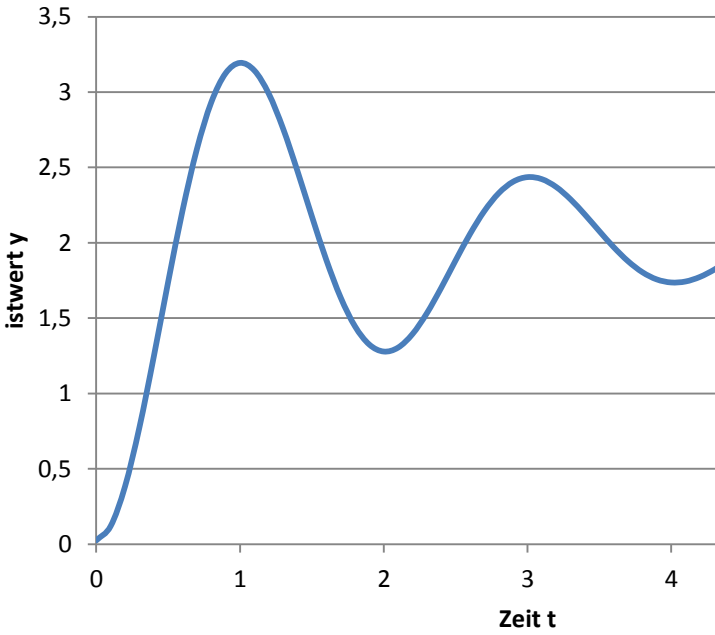


→ Dämpfung fehlt

Federpendel mit Dämpfung k & Kraft F

- DGL1: $F - D \cdot y - k \cdot y' = m \cdot y''$
- Ansatz: $y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \cdot \exp(-\delta \cdot t) + b$
- Einsetzen in DGL1, Koeffizientenvergleich, Anfangswerte … →
  - Abklingkonstante $\delta = k/2m$
  - Kreisfrequenz $\omega = [\omega_0^2 - \delta^2]^{0,5}$ mit $\omega_0 = (D/m)^{0,5}$
  - $\varphi = \arctan[\omega/\delta]$ & $A = - F/(D \cdot \sin \varphi)$ & $b = F/D$

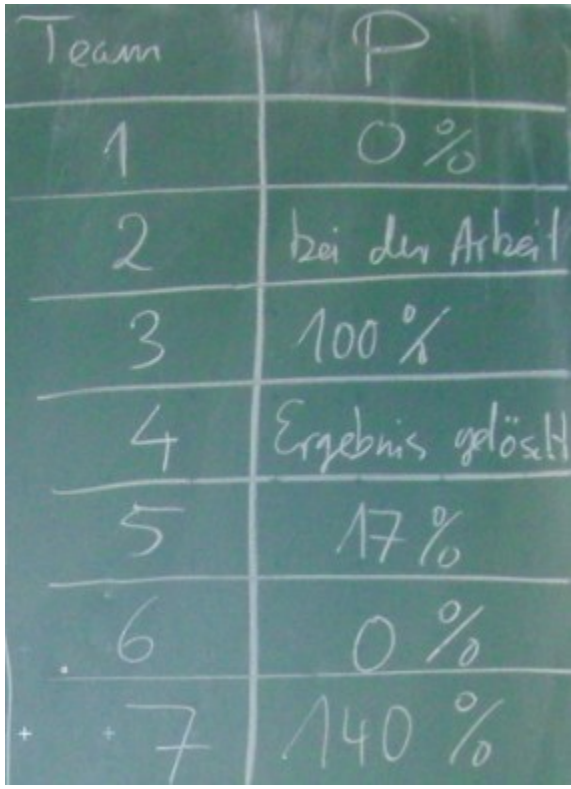
Kohärente SI-Einheiten
Sprungantwort für m = 1; D = 10; F = 20; k = 1



- **Regler**: $F_{Regler} = = k_p \cdot (w-y) - k_d \cdot y'$
- Idee: Wir reagieren schon auf den Trend y', **bevor** y eingetreten ist
- Einsetzen → DGL2: $F/m + k_p/m \cdot w - D/m \cdot y - k_p/m \cdot y - k/m \cdot y' - k_d/m \cdot y' = y''$
- Vergleich mit DGL1: $F_{neu} = F + k_p \cdot w$ & $D_{neu} = D + k_p$ & $k_{neu} = k + k_d$
- Lösung übertragen mit:
- $\delta = k_{neu}/2m$ & $\omega_0 = (D_{neu}/m)^{0,5}$ & $A = - F_{neu}/(D_{neu} \cdot \sin \varphi)$ & $b = F_{neu}/D_{neu}$

Federpendel: Reglerwettbewerb

- Obige Lösung: $y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \cdot \exp(-\delta \cdot t) + b$
  - $F_{neu} = F + k_p \cdot w$ & $D_{neu} = D + k_p$ & $k_{neu} = k + k_d$
  - $\delta = k_{neu}/2m$ & $\omega = [\omega^2 - \delta^2]^{0,5}$ mit $\omega_0 = (D_{neu}/m)^{0,5}$ & $\varphi = \arctan[\omega/\delta]$
  - $A = - F_{neu}/(D_{neu} \cdot \sin \varphi)$ & $b = F_{neu}/D_{neu}$
- Strafpunkte: $P = (|e_{max}| + |K_s - v|)/v \cdot 100\ \%$ mit $e_{max} = y_{max} - K_s$
- **Bestimme**: w, k_p & k_d
- Einsetzen in DGL1, Koeffizientenvergleich Anfangswerte … →
  - Abklingkonstante $\delta = k_p/2m$
  - Kreisfrequenz $\omega = [\omega_0^2 - \delta^2]^{0,5}$ mit $\omega_0 = (D/m)^{0,5}$
  - $\varphi = \arctan[\omega/\delta]$ & $A = - F/(D \cdot \sin \varphi)$ & $b = F/D$

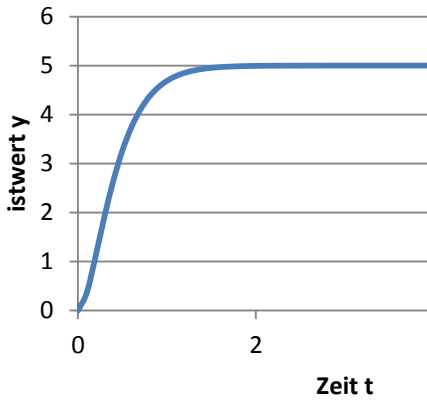


Team	P
1	0 %
2	bei der Arbeit
3	100 %
4	Ergebnis glöst
5	17 %
6	0 %
7	140 %

Kohärente SI-Einheiten

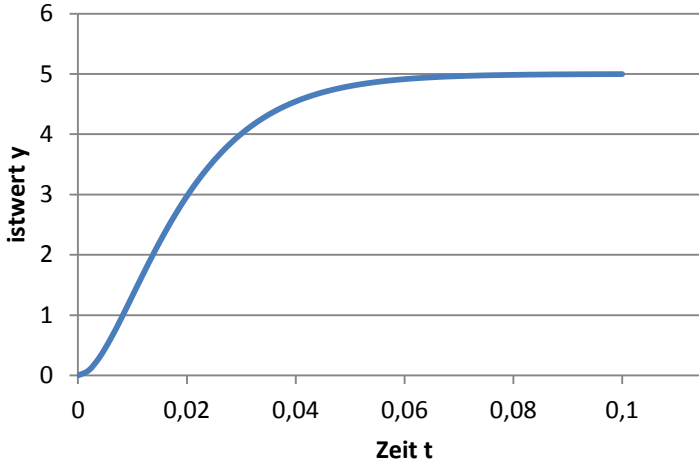
Regelung für m = 1; D = 10; F = 20; k = 0; v = 5; F = 0,6

- Lösungsstrategie
  - Ziel: keine langfristige Abweichung $v = K_s = F_{neu}/D_{neu} = = (F + k_p \cdot w)/(D + k_p) \rightarrow w = (D \cdot v + k_p \cdot v - F)/k_p$
  - Ziel: Kein Überschwingen: $\omega = 0 \rightarrow \omega_0^2 = \delta^2 = D_{neu}/m = = k_d^2/4m^2 \rightarrow k_d = [4mD_{neu}]^{0,5}$
  - Wähle $k_p = 10 \rightarrow D_{neu} = 20$; $k_d = 80^{0,5} = 8,94$; $w = 9,94$



Federpendel: Reglerwettbewerb 2

- Idee: Strafpunkte für Zeitbedarf
- Strafpunkte: $P = (|e_{max}| + |K_s - v|)/v \cdot 100\,\% + T_{95\%}/T_0 \cdot 100\,\%$
  - $e_{max} = y_{max} - K_s$ und $y(T_{95\%}) = 0{,}95K_s$ und $T_0 = 2$
- **Bestimme**: w, k_p & k_d
- Lösung wie oben



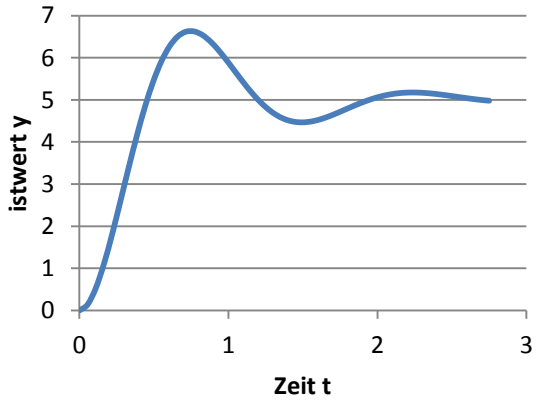
Kohärente SI-Einheiten
Regelung für m = 1; D = 10; F = 20; k = 0; v = 5; F = 0,6

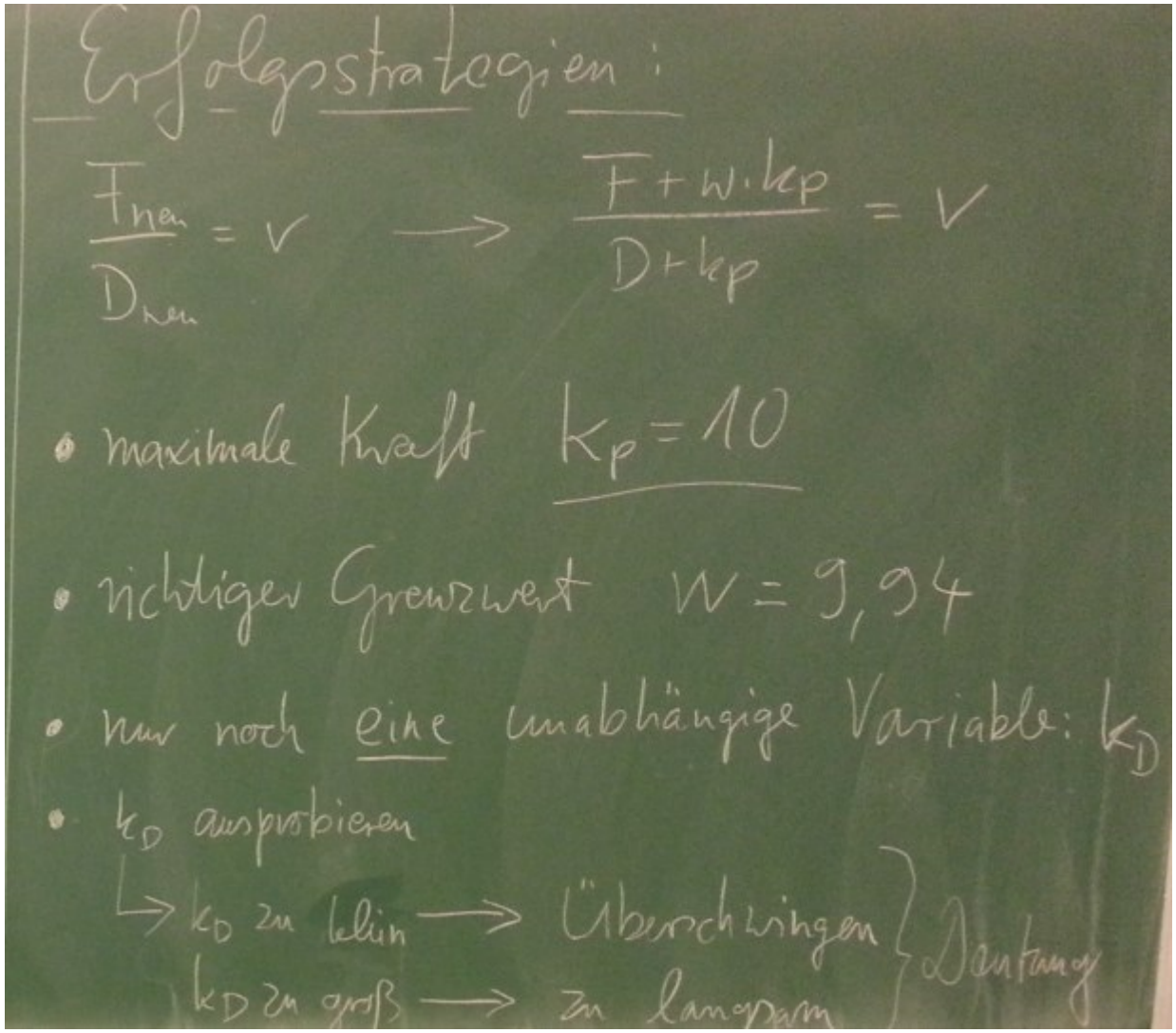
- Lösungsstrategie
  - Ziel: keine langfristige Abweichung $v = K_s = F_{neu}/D_{neu} = = (F+k_p \cdot w)/(D+k_p) \rightarrow w = (D \cdot v + k_p \cdot v - F)/k_p$
  - Ziel: Kein Überschwingen: $\omega=0 \rightarrow \omega_0^2=\delta^2=D_{neu}/m = k_d^2/4m^2 \rightarrow k_d = [4mD_{neu}]^{0,5}$
  - Wähle $k_p \rightarrow \infty$; z. B. $k_p = 10\,000 \rightarrow D_{neu} = 10\,010$; $k_d = 200$; $w = 5{,}0005$

Federpendel: Reglerwettbewerb 3

- Idee: begrenze Regler: $k_p \leq 10$
- Strafpunkte: wie oben
- **Bestimme**: w, k_p & k_d
- Lösung wie oben
- Lernende benennen Strategien
  - Sieger: $k_d = 3$ → 140 %

Kohärente SI-Einheiten
Regelung für m = 1; D = 10;
F = 20; k = 0; v = 5; F = 0,6





Erfahrungen

- Datenbasis: Bisher sechs Kurse an zwei Schulen in drei Jahren
- Klausuren: Mittelwerte: 11,4 & 10,8 & 8,6 (Xaver) Punkte
- Facharbeiten: Mittelwerte: 12,3 & 12,7 Punkte
- Umfrage: Mittelwert: Note 2
  - Sehr gut
    - Betreuung extern (Bestnote 1,18 → SIA optimal mit Seminarfach statt Wahlpflichtfach)
    - Betreuung intern
    - Lernzuwachs
    - Besuch externer Partner
    - Fair behandelt
  - Schlechtestes Ergebnis: Klausur sinnvoll: 3,9
- SchülerInnen können DGLs zu Schwingkreisen mit Dämpfung und Regelung lösen und anwenden
- Jugend forscht: Bisher ein zweiter Preis

Diskussion

- Sinnvolle verallgemeinerbare Themen [M95]
  - Balkentheorie exemplarisch für **Statik → didaktisiert**
  - Regelung mit schwingungsfähiger Regelstrecke exemplarisch für **Dynamik → didaktisiert**
  - PET, Kernspintomograph, Linearbeschleuniger exemplarisch für **Medizintechnik → PH-Unterricht**
  - Rotschlammrecycling, Solartechnik und Schiffsabgase exemplarisch für **Umwelttechnik → didaktisiert**
  - Logistik, Robotik, Elektrotechnik, Schiffs- & Flugzeugbau exemplarisch für Breite
- Pro
  - Einsicht in Leichtbau durch Hebelgesetz und Hooke‘sches Gesetz
  - Kontext sowieso nötig: hier relevant
  - Sanfte Lernkurve: erst Erfahrung, dann Theorie
  - Berufskunde bei Zukunftstechnologien mit hoher Verallgemeinerbarkeit
  - Seminarfach erfordert Fächerkombination: hier relevante Kombination
  - Kompetenzentwicklung durch anspruchsvolle Schüleraktivität
  - Vernetzung von Experiment und Theorie
- Kontra
  - Externe Partner halten sich manchmal nicht an Vereinbarungen
  - Zu wenig Physik? Zu wenig curricular? Zu aufwändig? Zu wenig Theorie?

[M95] Muckenfuß, Heinz: Lernen im sinnstiftenden Kontext. Berlin, Cornelsen 1995.

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

Übersicht zu Facharbeitsthemen

Stichwort	Anzahl
Jobelmannschule: Energiemonitoring	4
Hochschule Bremerhaven: Schiffsbetriebstechnik, Leichtbau, Logistik	6
Hochschule 21: Robotik, Automatisierungstechnik	2
Airbus: CFK-Leichtbau	3
Private Fachhochschule Stade: Leichtbaukonzepte	2
Technische Hochschule Harburg	1
DOW: Physikalische Messtechnik, Automatisierungstechnik in der Prozessindustrie	2
Klinik Dr. Hancken: Medizintechnik	2
NDB: Fotovoltaik, Elektrotechnik	2
PCC: Ingenieurbüre, Carbon	1
AOS: Nutzung von Rotschlamm, Jufo	1

Summe: 26 bei ca. 45 Schülerinnen und Schülern

→ Große Auswahl