

# Physiologie II

Vegetative Physiologie

Fachschaft Zahnmedizin Münster



# Zusammenfassung: Physiologie II

---

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung: Physiologie II .....	I
Inhaltsverzeichnis .....	III
ATMUNG.....	1
Lunge .....	1
Funktionen der Lunge.....	1
Belüftung der Lunge .....	1
Perfusion der Lunge .....	2
Druckverhältnisse in Lunge und Pleura .....	3
Intrapleurale (intrathorakale) Druck .....	3
Intrapulmonaler Druck .....	3
Lungenvolumina und Lungenkapazitäten .....	4
Statische Atemvolumina.....	4
Dynamische Atemvolumina.....	5
Totraum .....	6
Messverfahren: .....	7
Atmung.....	11
Atemmechanik .....	11
Muskulatur .....	11
Atemwiderstand.....	12
Atemzyklus .....	14
Gasaustausch.....	15
Ventilation der Lunge .....	15
Atemregulation .....	20
Atemtätigkeit.....	21
Atmung in der Höhe .....	21
DIE NIERE .....	22
Überblick .....	22
Funktionsgrößen der Nieren .....	26
Renaler Blutfluss und glomeruläre Filtrationsrate .....	26
Clearance .....	26
Nierendurchblutung .....	28



Renaler Blutdruck .....	28
Filtration .....	30
Tubulärer Transport organischer Stoffe .....	31
Glukose Resorption .....	32
Aminosäuren-Resorption .....	33
Resorption von Peptide und Proteine .....	33
Natrium -Resorption.....	33
Bikarbonat-Resorption .....	33
Kalzium-Resorption .....	34
Phosphat-Resorption.....	34
Kalium-Resorption.....	34
Harnsäure Ausscheidung.....	34
Harnstoff.....	34
Harnkonzentrierung .....	37
Steuerung der Nierenfunktion durch Hormone.....	39
Renin-Angiotensin-Aldosteron .....	40
Renale Säure- und Basenausscheidung.....	41
Diuretika .....	42
Osmotische Diuretika .....	42
Carboanhydrase-Hemmstoffe .....	42
Schleifendiuretika.....	42
Kalium-sparende Diuretika.....	42
Aldosteron-Antagonisten .....	42
Epithelien und Membranpotential.....	43
Membranpotential = elektrische Potentialdifferenz.....	43
Epithel.....	43
Einteilung der Epithelien .....	44
Epithelialer Transport.....	45
Klinik: Mukoviszidose (=zystische Fibrose).....	47
GASTROINTESTINAL-TRAKT .....	48
Nahrungsbestandteile .....	48
Vitamine .....	48
Spurenelemente .....	48
Kohlenhydrate .....	49
Verdauung .....	49

Resorption von Kohlenhydraten .....	50
Steuerung der Motilität des Gastrointestinaltrakts.....	51
Nervale Steuerung der Motilität .....	51
Motilitätsmuster.....	53
Verdauungssäfte.....	53
Der Magen.....	54
Magenabschnitte.....	55
Magensaft.....	55
Pankreas .....	59
Pankreasenzyme.....	59
Regulation der Pankreassekretion .....	59
Leber und Galle .....	60
Gallenflüssigkeit .....	60
Enterohepatischer Kreislauf .....	61
Darm.....	61
Überblick und Funktion .....	61
Motorik des Dünndarms.....	62
Motorik des Dickdarms (Kolon).....	62
Darmbakterien .....	63
Defäkation .....	63
Resorption der Nahrungsbestandteile .....	63
Aufnahme von Wasser, Elektrolyten und Eisen .....	64
Kohlenhydratresorption .....	66
Proteinresorption .....	66
Fettresorption .....	66
SÄURE-BASEN-HAUSHALT .....	68
Chemische Grundlagen .....	69
Säure-Basen-Gleichgewicht.....	69
pH-Wert.....	69
Regulation des Säure-Basen-Haushalts.....	70
Puffersysteme im Blut .....	70
Regulation des Säure-Basen-Haushalts über das respiratorische System .....	72
Regulation des Säure-Basen-Haushalts über die Niere.....	72
Regulation des Säure-Basen-Haushalts durch die Leber.....	73
Störungen des Säure Basen-Haushaltes.....	74



Respiratorische Störung .....	74
Metabolische Störung .....	75
Kompensationsmechanismen .....	75
HERZ-KREISLAUF-SYSTEM.....	77
Herz .....	77
Überblick und Funktion .....	77
Erregungsentstehung und -ausbreitung am Herzen .....	77
Herzmuskelzellen .....	78
Herzmechanik.....	83
Zeitlicher Ablauf der Herzaktion.....	83
Druck-Volumen-Veränderungen während des Herzzyklus .....	85
Regulation der Herztätigkeit .....	88
Frank-Starling-Mechanismus.....	88
Wirkung des vegetativen Nervensystems .....	90
Durchblutung und Stoffwechsel des Herzens .....	91
Regulation der Koronardurchblutung .....	91
Stoffwechsel des Herzens.....	91
EKG .....	92
Ableitungen .....	92
EKG Auswertung:.....	94
Diagnose von Rhythmusstörungen .....	97
Kreislauf.....	100
Allgemeine Hämodynamik .....	101
Physikalische Grundlagen.....	101
Blutdruck .....	105
Blutdruckregulation.....	106
Pulswellenanalyse .....	107
BLUT.....	109
Blutbestandteile .....	109
Hämatokrit.....	110
Erythrozyten = rote Blutkörperchen .....	110
Hämoglobin = roter Blutfarbstoff.....	113
Blutplasma.....	114
Blutserum .....	116
Anämien = Blutarmut .....	117

Hauptformen .....	117
Hämolyse .....	118
Blutgruppen.....	120
Blutgruppenbestimmung .....	120
Hämostase: Blutstillung und Blutgerinnung.....	121
Reperatur- und Verschlussmechanismen .....	121
Regulation und Hemmung der Gerinnung .....	127
Fibrinolyse .....	127
Klinik: Störung der Hämostase / Gerinnungstests .....	128
Blutentnahme.....	129
ARBEITS- UND LEISTUNGSPHYSIOLOGIE .....	130
Arbeit.....	130
Leistung .....	130
Metabolische und muskulären Umstellungsvorgänge bei körperlicher Arbeit .....	131
Energiegewinnung im Muskel .....	131
Deckung des Sauerstoffbedarfs im aktiven Muskel .....	134
Durchblutung des aktiven Muskels .....	134
Der Laktatstoffwechsel.....	134
Anpassungsreaktionen des herz-Kreislaufsystems .....	135
Anpassungsreaktion der Gefäße.....	135
Anpassungsreaktion des Herzens .....	135
Folgen der Anpassungsreaktionen für den Blutdruck.....	135
Anpassungsreaktionen des respiratorischen Systems .....	136
Körperliche Leistungsfähigkeit und Training .....	137
Leistungsfähigkeit des Menschen .....	138
Training.....	138
Leistungsdiagnostik .....	139





# ATMUNG

## Lunge

### Funktionen der Lunge

- **Aufnahme von O<sub>2</sub> und Abgabe vom CO<sub>2</sub>**
- Aufrechterhaltung des **Säure-Basen-Gleichgewichts**
- **Immunabwehr**
- **Endokrine Aktivität** bei einigen Erkrankungen

### Belüftung der Lunge

- Über das **Bronchialsystem** werden die **Alveolen belüftet**, in denen der Gasaustausch erfolgt
- Der Bronchialbaum teilt sich 23-mal. Dadurch entstehen **300 Mio. Alveolen** mit einer **Gesamtoberfläche** von **80-100m<sup>2</sup>**
- Die **Bronchien sind vegetativ innerviert**
  - Parasympathikus: Verengt die Bronchien
  - Sympathikus: Weitet die Bronchien
- **Alveolen**
  - **Typ I Pneumozyten** kleiden die Alveolen aus (**Teil der Blut-Gas-Schranke**)
  - **Typ II Pneumozyten** bilden den **Surfactant, der die Oberflächenspannung reduziert**. Surfactantmangel kann zum Kollaps ganzer Lungenabschnitte führen.
  - Sämtliche Alveolen bilden einen kommunizierenden Raum.
  - Kleine Alveolen haben eine höhere Oberflächenspannung als große Alveolen und daher die Tendenz, sich zusammenzuziehen
- Die **Strömungsgeschwindigkeit** ist in den großen Bronchien am höchsten. In den respiratorischen Bronchiolen kommt die Strömung praktisch zum Erliegen. Die Strömungsgeschwindigkeit der eindringenden Luft hat großen Einfluss auf den Ort der Ablagerung von Fremdkörpern im Bronchialbaum
- Die Atemwege bis zur 16. Teilungsgeneration bilden die **Konduktionszone**, die von der 17.-23. Teilungsgeneration die **Respirationszone**
- **Die Eindringtiefe von Fremdkörpern** in die Lunge ist von ihrer Größe abhängig:
  - **große Fremdkörper** fallen in den **oberen Luftwegen** aus (Nase, Rachen, große Bronchien - Flimmerepithel transportiert Fremdkörper mit Bronchialsekret rückwärts in Richtung Epiglottis (mukoziliärer Transport) und gelangen schließlich in den Magen)
  - **kleine Fremdkörper** erreichen die **Bronchiolen**
  - **sehr kleine Fremdkörper** (Schwebeteilchen) erreichen die **Alveolen**
- **Schutzreflexe: Niesen** (Schutzreflex der oberen Atemwege) und **Husten** (Schutzreflex der unteren Atemwege) bei Schleimhautreizung z.B: durch einen Fremdkörper

Durch die **starke Verzweigung** des Bronchialbaums wird eine **Erhöhung der effektiven Fläche** für den Gasaustausch um den **Faktor 1000** erreicht



## Perfusion der Lunge

- = **Lungendurchblutung**
- **Lungenspitzen sind schlechter durchblutet**
- Die **Durchblutung der Lunge kann körperlicher Arbeit angepasst werden**; in Ruhe werden nur ca. 50% der vorhandenen lungenskapillaren durchblutet, bei Arbeit (=erhöhten Herzzeitvolumen) können Reservekapillaren geöffnet werden
- Blutdruck in der A. pulmonalis verdoppelt sich bei Vervierfachung der Lungendurchblutung
- **kleiner Kreislauf ist ein Niederdrucksystem**: Blutdruck in A. pulmonalis: 25mmHg systolisch, 10mmHg diastolisch
  - regional unterschiedliche Perfusion
  - Lungenspitzen werden bei aufrechter Haltung schlechter durchblutet als die basisnahen Lungenanteile
- **Regulation der Gefäßweite**
  - **Euler-Liljestrand-Mechanismus**: In Bezirken mit niedrigem alveolären  $O_2$ -partialdruck verengen sich die zuführenden Pulmonalarterienäste

## Druckverhältnisse in Lunge und Pleura

### Intrapleurale (intrathorakale) Druck

- Lunge und Thoraxwand sind durch den **Pleuraspalt** voneinander getrennt.
- Im Pleuraspalt befindet sich ein **dünnere Flüssigkeitsfilm** (Flüssigkeiten sind nicht dehnbar und nicht kompressierbar!) durch den die Lunge an der Innenseite des Thorax haften bleibt und dessen Bewegungen folgt
- **Pleuraspalt: subatmosphärischer Druck von -0,5 kPa**
  - Negativer Druck ist bedingt durch die **Eigenelastizität der Lunge** und das damit verbundene Bestreben sich zur Mitte hin zusammen zu ziehen, was durch die **Flüssigkeitsfixierung** an den Thorax verhindert wird
  - **Inspiration:** Erweiterung des Thorax → **0,7 kPa**
  - **Expiration:** Nur bei sehr **forcierter Ausatmung** kann der intrapleurale Druck während der Ausatmung auch **positiv** werden

### Intrapulmonaler Druck

- **Ruhelage: äußerer Luftdruck** (Ausgleich der Drücke durch die Atemwege)
- Nur bei Thoraxbewegungen **während der Inspiration/Expiration** weicht der intrapulmonale Druck auf Grund der **Volumenveränderung der Lunge** von der Nulllinie ab → **Druckgefälle**, an dem entlang Luft in und aus der Lunge strömt

Bei **maximaler Ausatemstellung** ist die **Druckdifferenz** zwischen intrapleuralem und intrapulmonalem Druck am **geringsten**

1



## Lungenvolumina und Lungenkapazitäten

Das **Fassungsvermögen der Lunge variiert von Person zu Person stark**. Richtwerte beziehen sich auf gesunde, junge, männliche Probanden von 1,80 Körpergröße

- **Faktoren:**
  - Alter
  - Körpergröße
  - Körperbau
  - Geschlecht: Volumina bei Frauen sind ca. 25% geringer als die bei Männern
  - Trainingszustand

**Lungenvolumina:** einzeln messbare Atemgrößen

**Lungenkapazitäten:** Atemgrößen, die sich aus mehreren Lungenvolumina zusammensetzen

### Statische Atemvolumina

- **Totalkapazität (=maximales Lungenvolumen) TLC** = maximales Gasvolumen der Lunge ,  
Summe aus Vitalkapazität und Residualvolumen  $TLC = VC + RV$
- **Atemzugvolumen AZV**= das mit jedem Atemzug ein- und ausgeatmetes Volumen
  - Ruhelage: ca. 0,5l
  - **Atemminutenvolumen** in Ruhr bei Atemfrequenz von 14 Atemzügen/Minute: 7l/min
- **Inspiratorisches Reservevolumen IRV: ca. 3,5l**  
Volumen, das über den normalen Atemzug hinaus **maximal eingeatmet** werden kann
- **Expiratorisches Reservevolumen ERV: ca. 2l**  
Volumen, das über die Atemruhelage hinaus **maximal ausgeatmet** werde kann
- **Vitalkapazität VC: ca. 6l**  
Summe aus Atemzugvolumen, expiratorischem und inspiratorischen Reservevolumen -  **$VC = AZV + IRV + ERV$**   
Ermittlung erfolgt, indem der Proband zunächst maximal inspiziert und anschließend maximal expiriert
- **Residualvolumen RV: ca. 1,4l**  
Luft, die sich auch nach maximaler Expiration noch in der Lunge befindet = Differenz zwischen dem maximalen Lungenvolumen TLC und der Vitalkapazität. Beim Gesunden ca. 1/4 des Lungenvolumens --  **$RV = TLC - VC$**
- **Funktionelle Residualkapazität FRC:**  
Volumen, das sich bei normaler Atmung am Ende der Ausatmung noch in der Lunge befindet. Mit diesem Puffervolumen vermischt sich die neu eingeatmete Luft, sodass die Gaszusammensetzung im Alveolarraum in etwas konstant bleibt und nur minimalen respiratorischen Schwankungen unterliegt  
 **$FRC = ERV + RV$**

2

## **Dynamische Atemvolumina**

(Messung auf Zeit)

- **Forciertes expiratorisches Volumen**
  - absolut
  - relativ (FEV/VC)
- **Atemgrenzwert:** maximale Frequenz x max. Volumen
  - in Ruhe: 8l, steigerbar auf bis zu 150l bei maximaler Anstrengung



## Totraum

- Bei jedem Atemzug gelangt nur ein Teil der inspirierten Luft in den Alveolarraum und nimmt am Gasaustausch teil
- In Atemruhelage setzt sich das Gasvolumen der Lunge aus dem anatomischen Totraum und dem Alveolarraum zusammen
- Eine Vergrößerung des Totraumvolumens weist auf eine gestörte Lungenfunktion hin (z.B. durch Rauchen, Staublunge)
- **Totraumvolumen**
  - = Teil der Inspirationsluft, der nicht am Gasaustausch teilnimmt
  - ca. 150ml
  - **Funktion:** Reinigung, Anfeuchtung, Erwärmung der Atemluft, Teil des Stimmorgans
  - **Beim Gesunden stimmen funktioneller und anatomischer Totraum überein**
  - **anatomischer Totraum**
    - **Raum des respiratorischen Traktes**, der belüftet ist, aber kein Gasaustausch stattfindet: Mund, Nase, Pharynx, Larynx, Trachea Bronchien und Bronchiolen (bis zur 16. Teilung des Bronchialbaums)
    - **Konduktion**
    - **Volumen: 150ml**
  - **funktioneller Totraum**
    - anatomischer Totraum + Lungenbereiche mit sehr hohen Ventilations-Perfusions-Quotienten (z.B. Lungenspitzenareale, Lungenteile, in denen das Blut auf Grund einer beeinträchtigten Durchblutung nicht arterialisiert werden kann)
- **Bestimmung** des Totraumvolumens mittels **Spirometrie**
  - Atemzugvolumen  $V_T$  = expiratorisches Atemvolumen  $V_E$
  - $V_E$  = Totraumvolumen  $V_D$  + Alveolarvolumen  $V_A$
  - Für die Teilvolumina lassen sich Anteile eines bestimmten Gases angeben  
**(fraktionelle Konzentration eines Gases)**  
 $F_E$  = fraktionelle Konzentration im Expirationsvolumen  
 $F_I$  = fraktionelle Konzentration in der Inspirationsluft (=  $F_D$ )  
 $F_A$  = fraktionelle Konzentration im Alveolarvolumen
  - Für **CO<sub>2</sub>** gilt:  $F_I = 0$ , damit gilt:  
$$V_D = \frac{V_E (F_A - F_E)}{F_A}$$
- **Totkapazität:** Volumen, dass sich nach maximaler Inspiration in der Lunge befindet= Vitalkapazität + Residualvolumen

## Messverfahren:

### Spirometrie → Atemvolumina

- Verfahren zur **quantitativen Erfassung statischer und dynamischer Atemvolumina**
- **Spirometer** sind Geräte zur Sammlung, Registrierung und Abgabe von Atemgasvolumina.
- Sie bestehen aus einer in Wasser schwebend gelagerten Glocke, in deren geschlossenen Raum der Proband über einen Schlauch ein- und ausatmet. Das Spirometer misst die bewegten Gasvolumina anhand der Auf- und Abbewegungen der Glocke
  - **offene Spirometersysteme:** apparative Ein- und Ausatmungsteile sind voneinander getrennt, Versuchsperson atmet aus dem Einatmungsteil O<sub>2</sub>-reiches Gas ein und in ein Ausatmungsteil das O<sub>2</sub>-reduzierte und CO<sub>2</sub> angereicherte Gas aus
  - **geschlossene Spirometersysteme:** Versuchsperson atmet in denselben Behälter ein und aus, um Anreicherung des CO<sub>2</sub> im Vorratbehälter zu vermeiden, wird das Gas einem CO<sub>2</sub>-Absorber zugeführt. (Dieses kann zur Darstellung des Verhaltens unter CO<sub>2</sub> Überschuss entfernt werden - Hyperkapnie)
- fortschreitende Registrierung der Volumenschwankungen durch die Inspiration und Expiration
- **erfasste statische Atemvolumina:**
  - Vitalkapazität
  - Atemzugvolumen
  - inspiratorisches Reservevolumen
  - expiratorisches Reservevolumen
- **erfasste dynamische Atemvolumina (Atemzeitvolumen)**
  - forciertes expiratorisches Volumen in der 1. Sekunde enier Expiration
  - Atemminutenvolumen
  - Atemgrenzwert



## Obstruktive Ventilationsstörungen

- obstruktive Ventilationsstörungen = **Erhöhung des Atemwiderstandes** infolge einer **Verengung/Verlegung (Obstruktion) der Atemwege**
  - Schleim, muskuläre Engstellung, Tumorstenosen
  - klinische Bilder: Asthma, chronische Bronchitis, Lungenemphysem
- **Folge:**
  - Ventilation der Lunge kann nicht in der erforderlichen Geschwindigkeit erfolgen → **Änderung der dynamischen Lungenvolumina :**
    - Vitalkapazität →
    - FEV<sub>1</sub> absolut ↓
    - FEV<sub>1</sub> relativ ↓
  - Erhöhung der geleisteten **Atemarbeit**
  - Häufig Überblähung des Lungengewebes, da noch Luft eingeatmet, aber bei der Ausatmung nicht mehr mobilisiert werden kann → **erhöhtes Residualvolumen**
- **Symptom:** Atemnot
- **Hagen-Poiseuille:**
  - Bereits **kleine Änderungen des Durchmessers** eines Bronchiolus hat eine **dramatische Änderung des Strömungswiderstandes** zur Folge.
  - Der **Strömungswiderstand ist umgekehrt proportional zu r<sup>4</sup>**, eine Halbierung des Durchmessers würde zu einem 16x des Strömungswiderstand führen

$$R = \frac{8 \cdot \eta \cdot L}{r^4 \cdot \pi}$$

$\eta$  = Viskosität des Mediums (hier Luft)  
 $L$  = Länge des betrachteten Schlauch- oder Rohrabschnitts

- **Messmethode:** Glockenspirometer
  - Bei der **Expiration** wird ein glockenartig in den Raum des Spirometers eingelassener **Zylinder angehoben**, während er bei einer **Inspiration** in den Vorratsbehälter **eintaucht**
  - Mit jeder Inspiration wird dem Vorratsraum mehr O<sub>2</sub> entnommen, als mit der Expiration zugeführt wird → Die Glocke sinkt von Atemzyklus zu Atemzyklus ab, wodurch die **registrierte Kurve zunehmend nach oben verlagert** wird
  - **ansteigende Nulllinie** (Mittellage) ist Maß für den O<sub>2</sub> Verbrauch

## Restriktive Ventilationsstörungen

- Restriktive Ventilationsstörungen = **Veränderungen der Lunge oder des Thorax**, die zu einer **Veränderung der statischen Lungenvolumina** führen
  - Vitalkapazität: ↓
  - FEV<sub>1</sub> absolut: ↓
  - FEV<sub>1</sub> relativ: ↓/→
- **Ursache:**
  - **mechanisch komprimierende Prozess** (Thoraxdeformitäten)
  - **Änderungen in der Compliance** der Einheit Thorax/Lunge
  - **Verlust von funktionellem Lungengewebe** (Lungenfibrose)
  - **Funktionsstörungen der Atemmuskulatur**
- **Klinisch:** Lungenfibrose, Bronchitis



4

### Kombinierte Ventilationsstörungen

- Obstruktive und Restriktive Ventilationsstörungen treten auch in Kombination auf. Dabei ist die **restriktive Lungenveränderung** häufig eine **Folge der langfristig bestehenden obstruktiven Störung** (z.B. Lungenfibrose bei vorbestehendem Asthma bronchiale)

### TIFFENEAU-Test (Atemstoßtest) → forciertes Expirationsvolumen

- **Ziel:** Aufdeckung von obstruktiven Atemstörungen
- **Methode:** Methode ermittelt das **forcierte Expirationsvolumen**, das nach maximaler Inspiration unter größter Anstrengungen binnen 1s ausgeatmet werden kann (FEV<sub>1</sub>= forced expired volume in one second)
- **Messwerte** werden zu der jeweiligen individuellen **Vitalkapazität VC in Bezug** gesetzt:  
 $FEV_1/VC * 100$
- **Beinflussung** der Messwerte
  - **Körpergröße**
  - **Alter** (ältere VP haben weniger elastisches Lungengewebe → Bronchialkollaps)
  - **Mitarbeit** der Versuchsperson
- **Auswertung:** bei Werten unter 70% besteht wahrscheinlich ein erhöhter Widerstand in den Atemwegen

5



## Maximale expiratorische Stromstärke (Maximal expiratory Flow MEF)

- **Definition:** MEF = stärkste Stromstärke, die eine Versuchsperson nach maximaler Inspiration während der folgenden Expiration erreichen kann
- **3 Phasen:** Die MEF steigt in weniger als 0,1s von 0l/s auf 10l/s

Referenzwerte der MEF nach QUANJER: wirksamen Atemmuskulatur und willkürlicher Beeinflussung durch VP

Frauen:  $5,50 \times H - 0,030 \times A - 1,11 \pm 0,90$  l/s

Männer:  $6,14 \times H - 0,043 \times A + 0,15 \pm 1,21$  l/s

- **initiale Phase:** Stromstärke ist abhängig von Kontraktionskraft der expiratorisch wirksamen Atemmuskulatur und willkürlicher Beeinflussung durch VP
- **mittlere Phase:** Stromstärke ist abhängig von der Stärke der wirksamen Widerstände in den Atemwegen
- **terminale Phase:** Stromstärke ist abhängig von Kontraktionskraft der expiratorisch wirksamen Atemmuskulatur und willkürlicher Beeinflussung durch VP
- **Anwendung:** sensibler Test für die Diagnostik beginnender pathologischer Veränderungen an den kleinen Atemwegen
- **Kurvenverlauf:**
  - **steiler Anstieg** der Kurve bis zum Scheitelpunkt = abhängig von der Expirationskraft
  - **linear langsamer Abstieg** bis zum Ende der Vitalkapazität = abhängig von Anatomie der Atemwege
  - bei ventilatorischen Verteilungsstörungen nimmt die Atemstromgeschwindigkeit überproportional ab, sodass diese Linie stark "durchgebogen" ist