

# Grundlagen der Immunologie

*Vorlesungen 21.-22.*

## **Allergie und die Überempfindlichkeitsreaktionen**

**Zelluläre und molekulare Mechanismen von  
Allergien**

# Immunsystem

**ERKENNUNG**

**EIGENE**

**NICHT-EIGENE**

**normale Immun-homeostase**

**TOLERANZ**

**ELIMINIERUNG**



**AUTOIMMUNITÄT**

**TUMOREN**

**IMMUN  
DEFIZIENZEN**

**ÜBEREMPFIN-  
DLICHKEITS  
REAKTIONEN**

**VERÄNDERTE Immun-homeostase= IMMUNOPATHOLOGIE**

# Überempfindlichkeitsreaktionen (Hypersensibilität )

- Pathologische Überreaktionen der Immunantwort in der Effektorphase mit Gewebeschädigung (Nekrose)
- Krankheiten, die durch das Immunsystem selbst ausgelöst werden
- Verschiedene Mechanismen können im Hintergrund nachgewiesen werden.
- **Gell und Coombs** haben vorgeschlagen, vier Typen der Überempfindlichkeitsreaktionen zu unterscheiden (1963).



# Classification of hypersensitivity reactions

Melanie C. Dispenza, M.D., Ph.D.

Table 1 Modern classification of hypersensitivity reactions\*

Classification Type	Immunologic Mechanisms	Clinical Examples
I	Mast cell-mediated reactions IgE-dependent (anaphylactic)	Anaphylaxis, angioedema, urticaria, asthma, allergic rhinitis
	IgE-independent (nonimmunologic or anaphylactoid)	Reactions to iodinated contrast reagents and some biologics
IIa	Antibody-mediated cytotoxic reactions (IgG/IgM antibodies); complement often involved	Immune cytopenias
IIb	Antibody-mediated cell-stimulating reactions	Graves disease, chronic idiopathic (spontaneous) urticaria
III	Immune complex-mediated complement activation	Serum sickness, drug-induced lupus, vasculitis
IVa	Th1 cell-mediated macrophage activation	Type 1 diabetes, contact dermatitis (with type IVc), tuberculin test reactions
IVb	Th2 cell-mediated eosinophilic inflammation	Maculopapular exanthems, DRESS syndrome, persistent asthma, allergic rhinitis
IVc	Cytotoxic T cell-mediated reactions	SJS and/or TEN, bullous exanthems
IVd	T cell-mediated neutrophilic inflammation	AGEP, Behçet's disease

*IgE = Immunoglobulin E; Th = T-helper cell; DRESS = Drug Reaction with Eosinophilia and Systemic Symptoms; SJS = Stevens-Johnson syndrome; TEN = toxic epidermal necrolysis; AGEP = acute generalized exanthematous pustulosis.*

*\*Adapted from Ref. 14.*

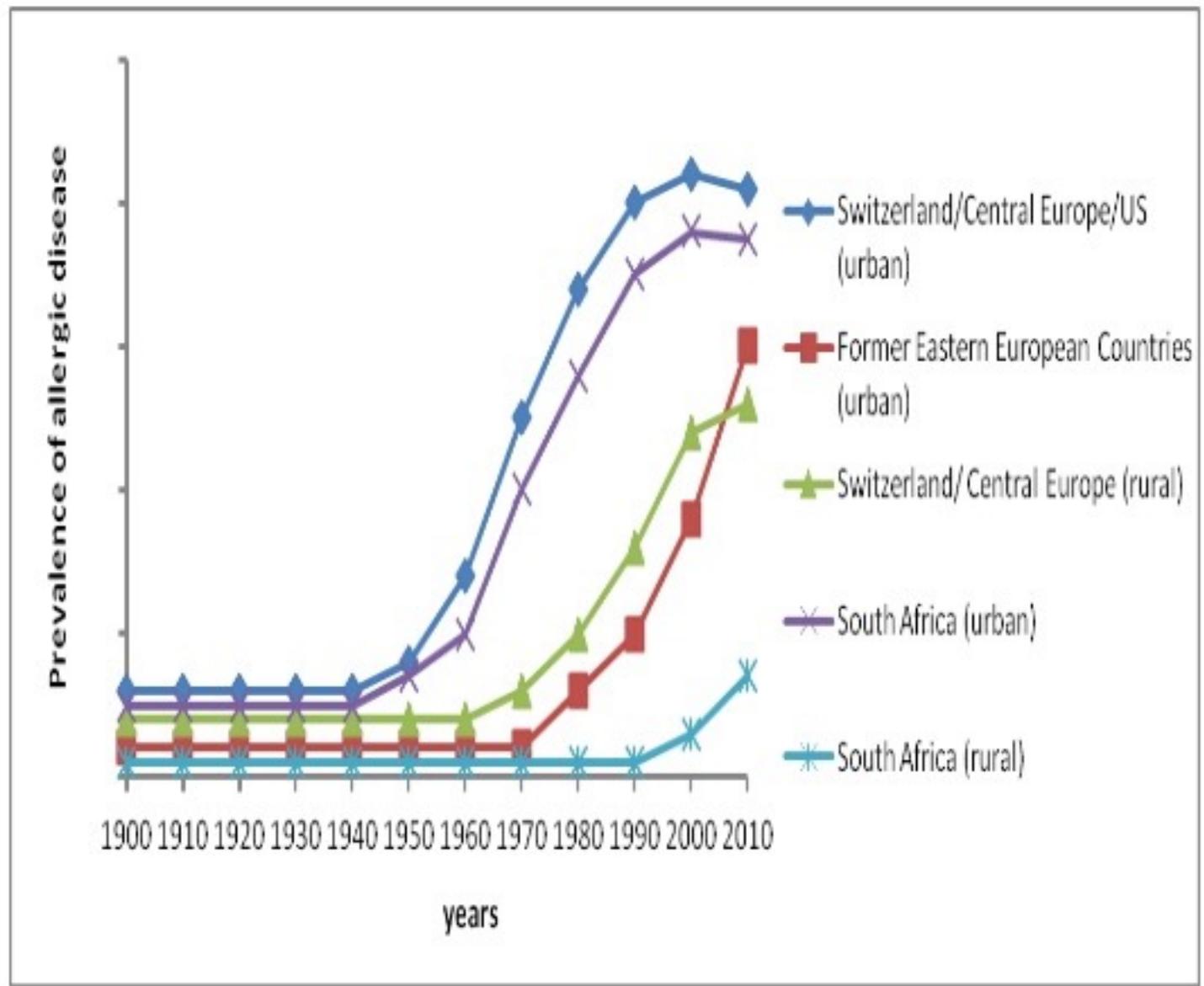
In: (Allergy Asthma Proc 40:470–473, 2019; doi: 10.2500/aap.2019.40.4274)

	Type I	Type II		Type III	
Immune reactant	IgE	Typ II a	IgG	Typ II b	IgG
Antigen	Soluble antigen	Cell- or matrix-associated antigen	Cell-surface receptor	Soluble antigen	
Effector mechanism	Mast-cell activation	Complement, FcR <sup>+</sup> cells (phagocytes, NK cells)	Antibody alters signaling	Complement, Phagocytes	
Example of hypersensitivity reaction	Allergic rhinitis, asthma, systemic anaphylaxis	Some drug allergies (eg, penicillin)	Chronic urticaria (antibody against FCεR1α)	Serum sickness, Arthus reaction	

Figure 12-2 part 1 of 2 Immunobiology, 6/e. (© Garland Science 2005)

	Type IV		
	Typ IV a	Typ IV b	Typ IV c
<b>Immune reactant</b>	T <sub>H</sub> 1 cells	T <sub>H</sub> 2 cells	CTL
<b>Antigen</b>	Soluble antigen	Soluble antigen	Cell-associated antigen
<b>Effector mechanism</b>	Macrophage activation	IgE production, Eosinophil activation, Mastocytosis	Cytotoxicity
	<p>IFN-<math>\gamma</math> T<sub>H</sub>1</p> <p>chemokines, cytokines, cytotoxins</p>	<p>IL-4 IL-5 T<sub>H</sub>2</p> <p>eotaxin</p> <p>cytotoxins, inflammatory mediators</p>	<p>CTL</p>
<b>Example of hypersensitivity reaction</b>	Contact dermatitis, tuberculin reaction	Chronic asthma, chronic allergic rhinitis	Contact dermatitis

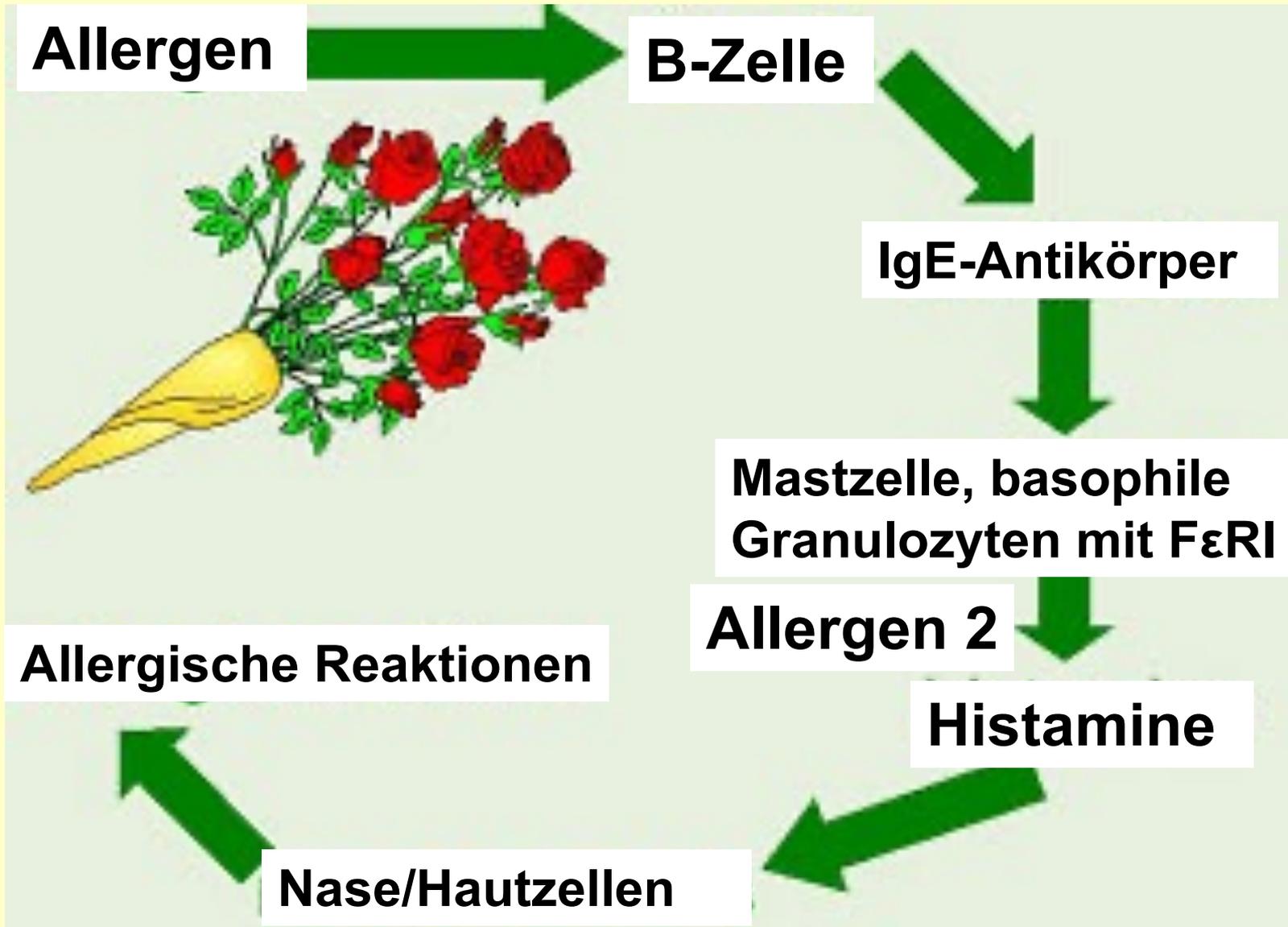
Figure 12-2 part 2 of 2 Immunobiology, 6/e. (© Garland Science 2005)



# **Überempfindlichkeitsreaktion vom Soforttyp Typ-I**

**sofortiger Typ;  
Allergie, Atopie**

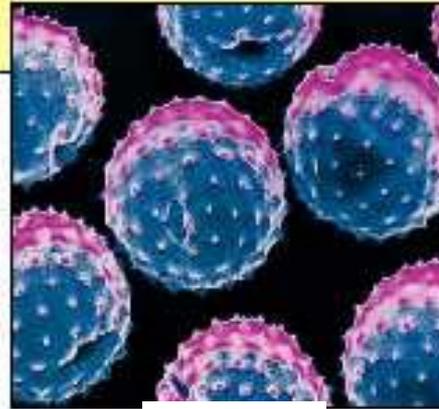
# Grundmechanismus



# Allergene

## Inhalierte Materialien

- Pflanzenpollen**
- Haustierhaare**
- Schimmelpilzsporen**
- Fäkalien von kleinen Tierchen**  
z.B. Hausstaubmilbe
- Nahrungsbestandteile**



**Pollen**



**Hausstaubmilbe**

## eingestochene Materialien

- Insektengifte**
- Vakzinen**
- Medikamente**
- Therapeutische Proteine**



**Wespe**

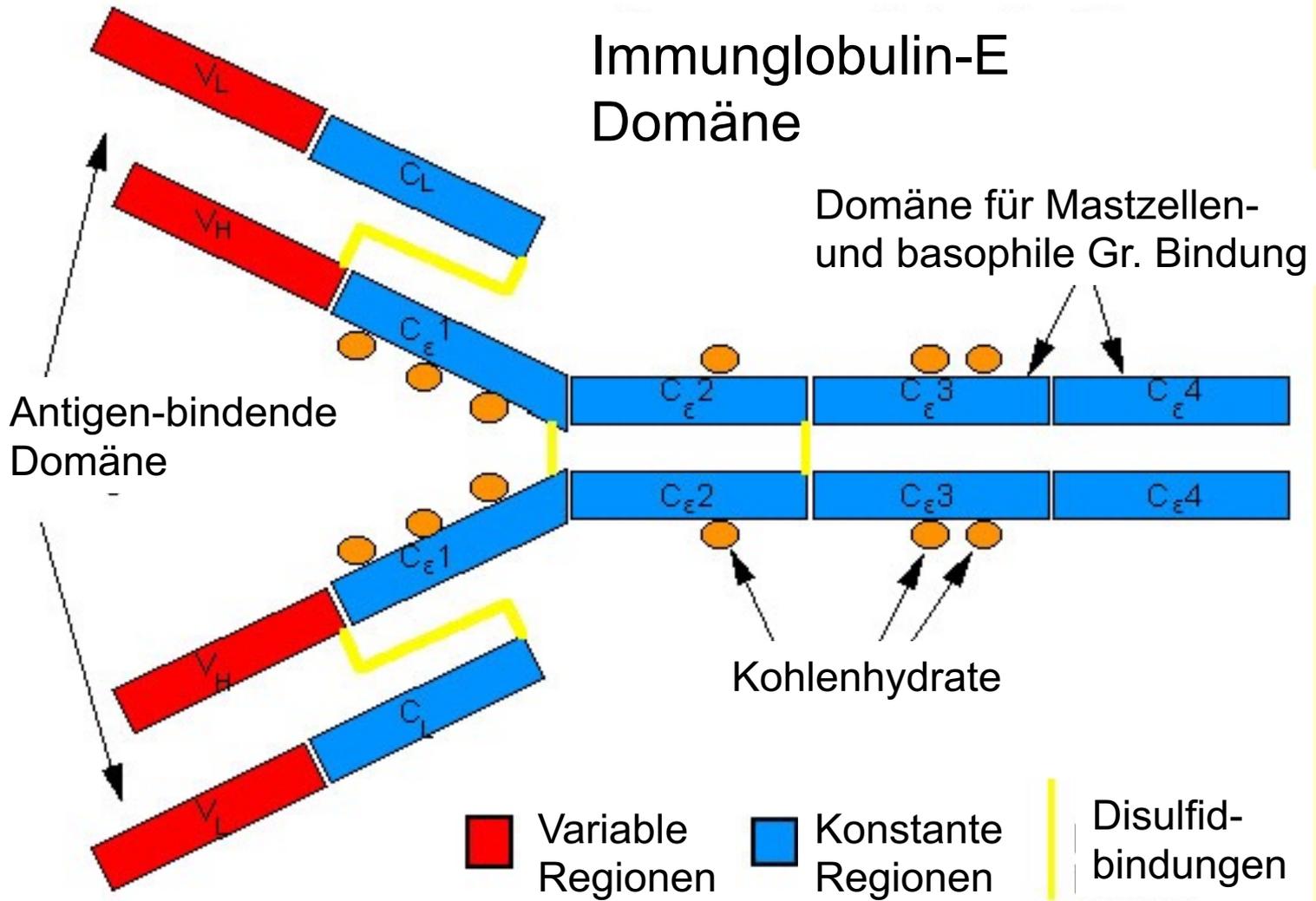


**Medikamente**

## Eigenschaften inhalierter Allergene, die IgE-Reaktionen fördern können, indem sie Th2-Zellen aktivieren

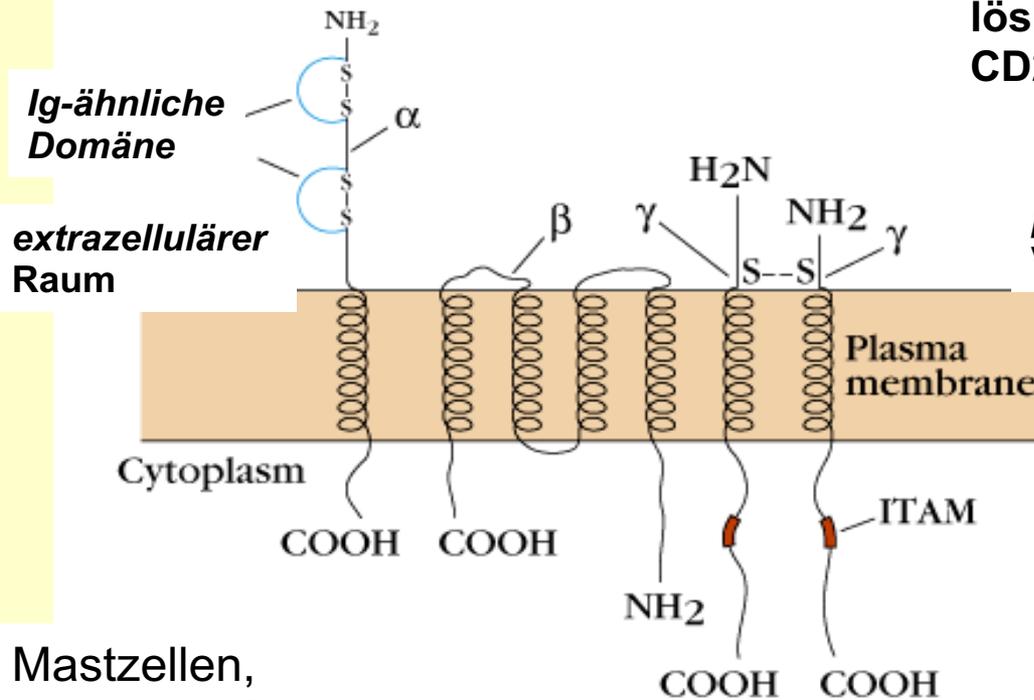
Proteine	Nur Proteine lösen T-Zell-Antworten aus
Enzymatisch aktiv	Allergene sind häufig Proteasen
Niedrige Dosis	Begünstigen die Aktivierung IL-4 produzierender CD4-Th2-Zellen
Niedriges Molekulargewicht	Allergen kann aus dem Partikel in den Schleim diffundieren
Gute Löslichkeit	Allergen kann aus dem Partikel leicht freigesetzt werden
Stabil	Allergen kann aus getrocknetem Partikel herausgelöst werden
Enthält Peptide, die an körpereigene MHC-II binden	Für die Aktivierung der Th-Zellen sind die Peptide bei dem ersten Kontakt (Primärantwort) notwendig

# Immunglobulin-E Domäne



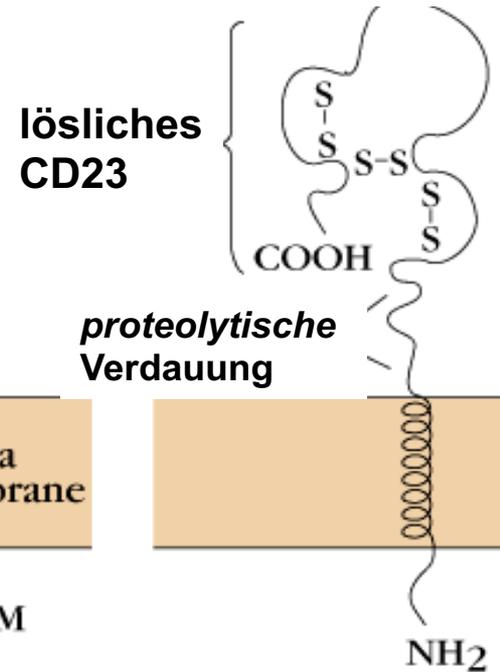
# IgE-bindende-Rezeptoren

(a) FcεRI:  
hoch-affiner IgE-Rezeptor



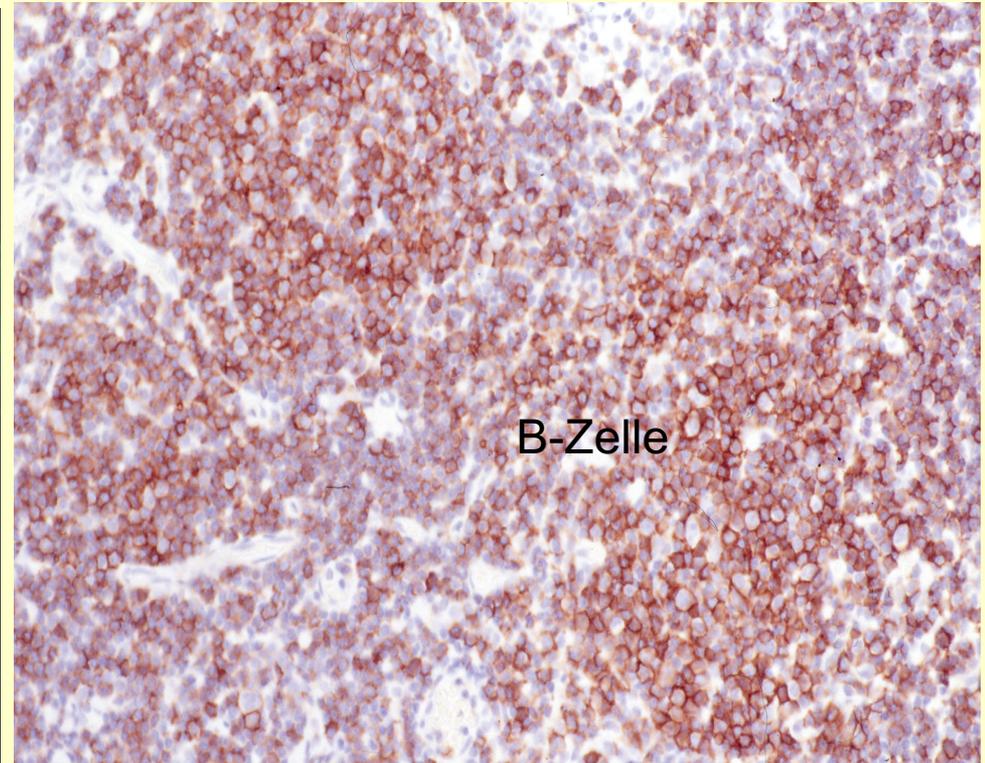
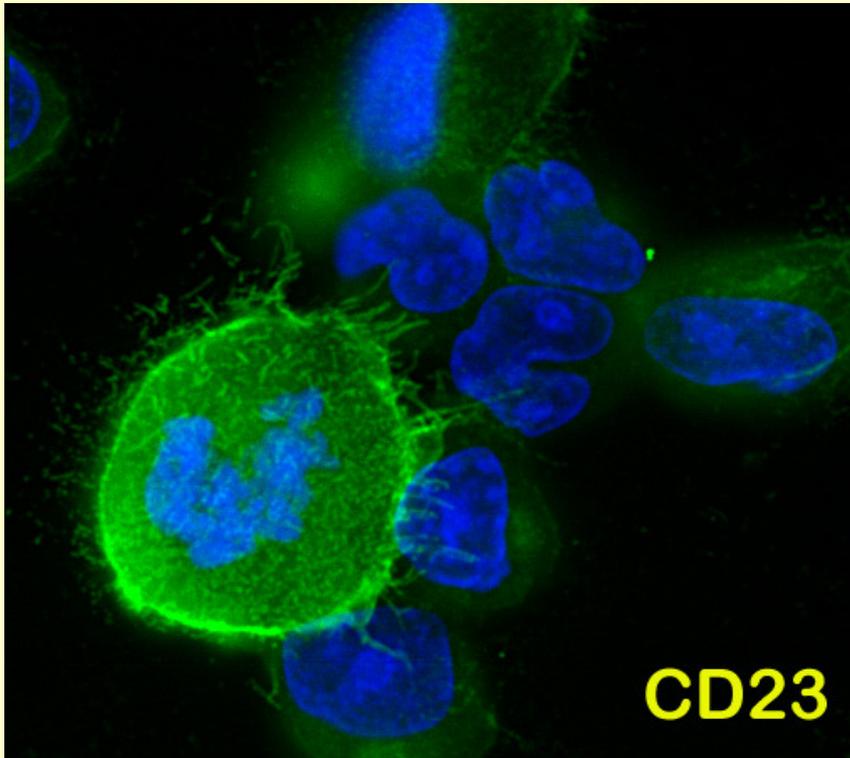
Mastzellen,  
basophile Granulozyten

(b) FcεRII (CD23):  
niedrig-affiner IgE-Rezeptor

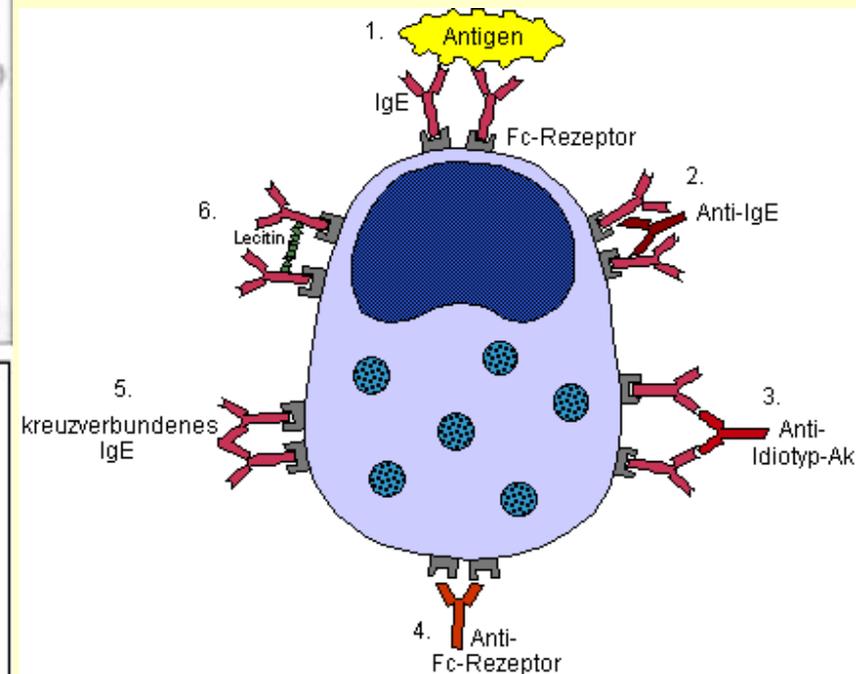
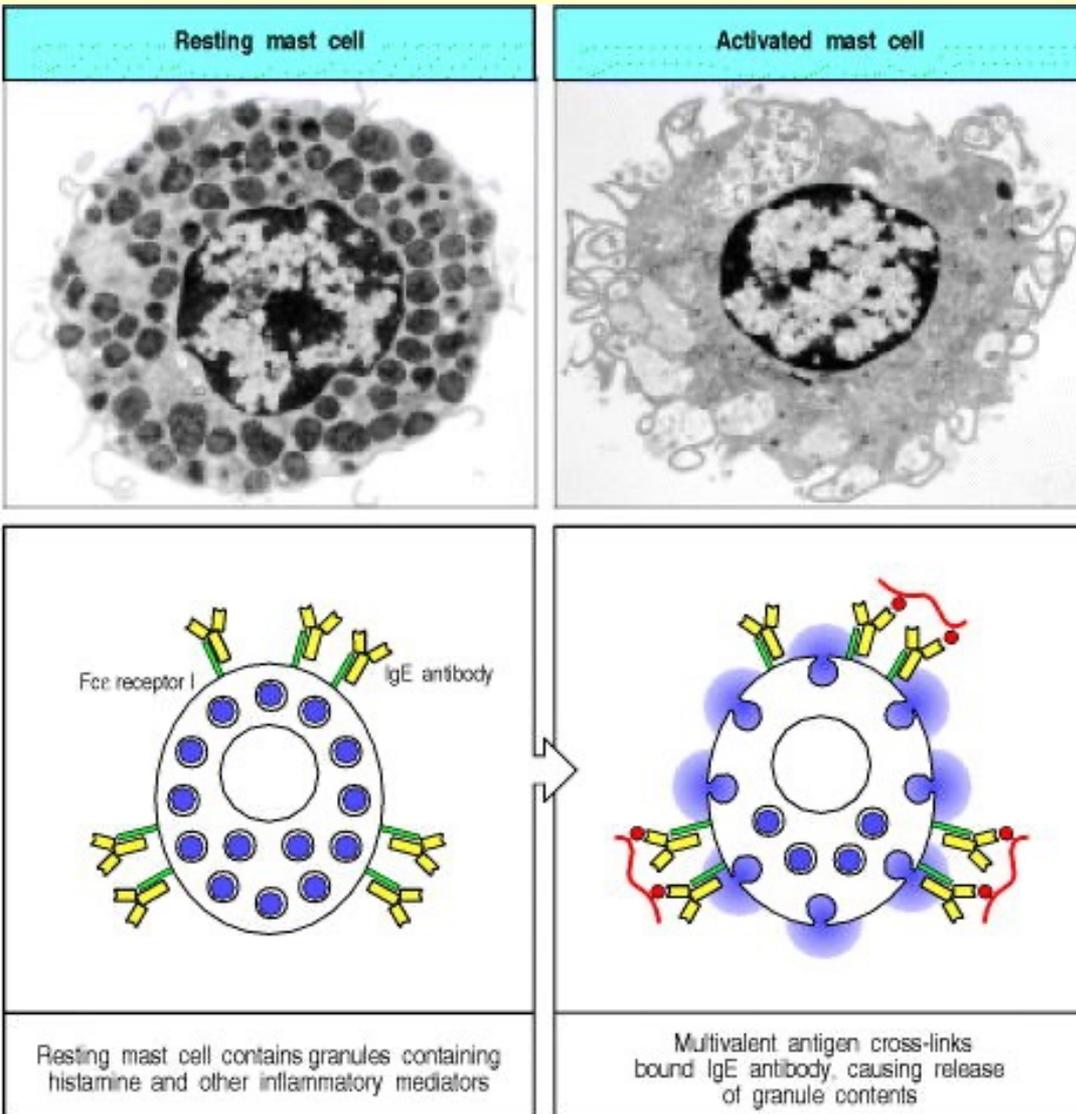


B-Zelle, T-Zelle, DC  
Makrophagen

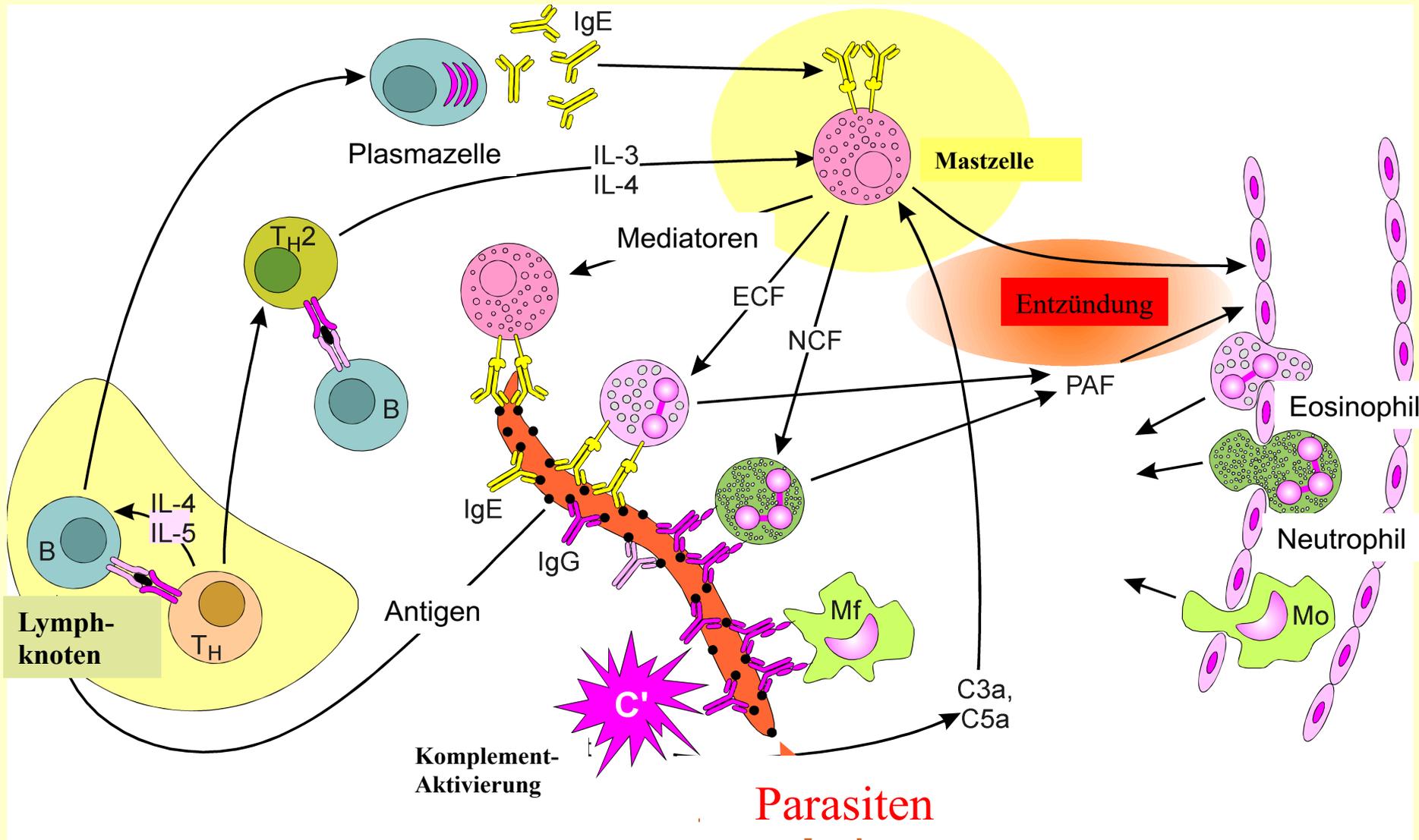
# CD23 auf Eosinophylen und B-Lymphozyten



# Die Vernetzung von FcεR-gebundenen IgE-Antikörpern auf Mastzellen führt zur Freisetzung entzündungsspezifischer Mediatoren



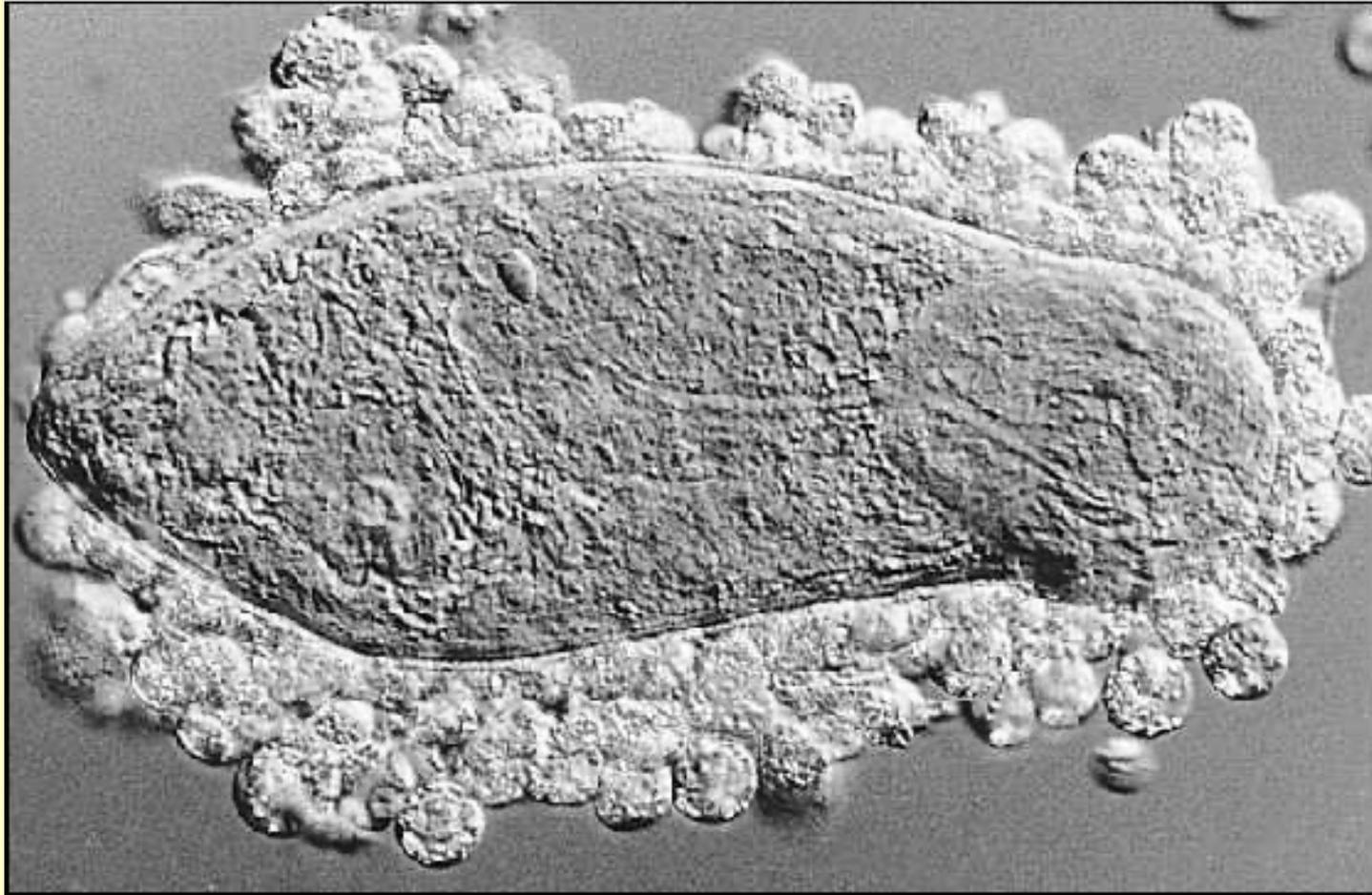
# Physiologie der IgE-Antwort gegen Parasiten oder Pilzinfektionen



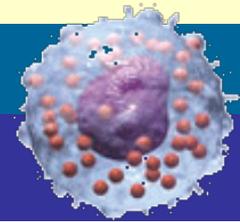
*Shistosoma mansoni* (bilharzia)

# Mit IgE umhüllte Parasiten aktivieren eosinophile Granulozyten um ihre toxische Granula freizusetzen

Figure 7.25



# Mediatoren der sofortigen Hypersensibilität



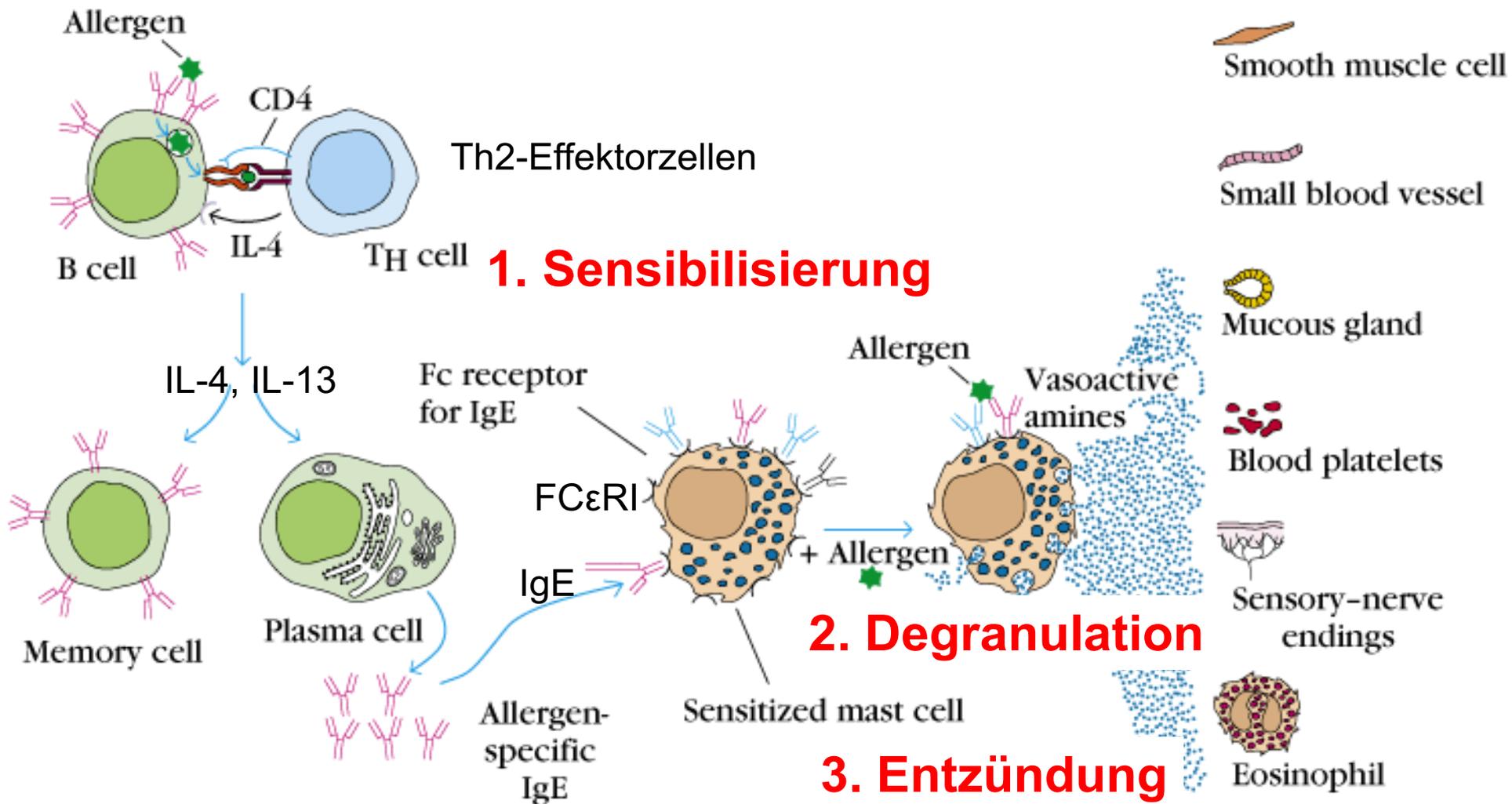
## Präformierte Mediatoren in Granulen

Histamin, Heparin	Bronchusverengung, Schleimsekretion, Vasodilatation, vaskuläre Permeabilität
Tryptase	Proteolysis
Kininogenase	Kinine und Vasodilatation, vaskuläre Permeabilität, Ödem
ECF-A (tetrapeptides)	Anziehung von Eosinophilen und Neutrophilen

## Neuformierte Mediatoren

Zytokine IL-4, IL-13, IL-3, IL-5, GM-CSF	verstärken die Reaktion der Th2-Zellen fördern die Bildung und Aktivierung von Eosinophilen
Leukotriene B <sub>4</sub>	Basophilanziehung
Leukotriene C <sub>4</sub> , D <sub>4</sub>	gleich wie Histamine aber 1000x effektiver
Prostaglandin D <sub>2</sub>	Ödem und Schmerz
PAF	Blutplättchenaggregation und Heparinausscheidung: Mikrothromben

# Mechanismus der Überempfindlichkeitsreaktion vom Typ-I



# Die Bindung von Antigenen an IgE führt zur Verstärkerung der IgE-Produktion

Von Plasmazellen sezerniertes IgE bindet an den hochaffinen Fc-Rezeptor, Fc $\epsilon$ RI, auf den Mastzellen

Aktivierte Mastzellen stellen Kontakt zu B-Zellen her und sezernieren Signalmoleküle, wodurch in den B-Zellen die IgE-Produktion angeregt wird

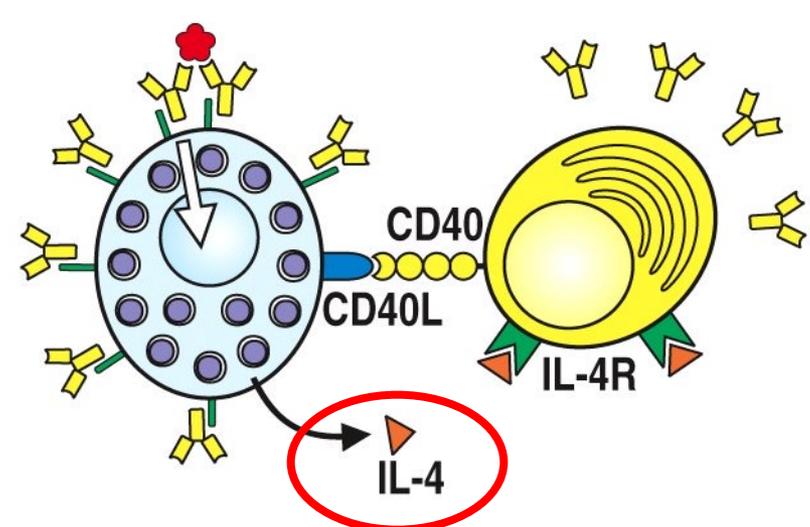
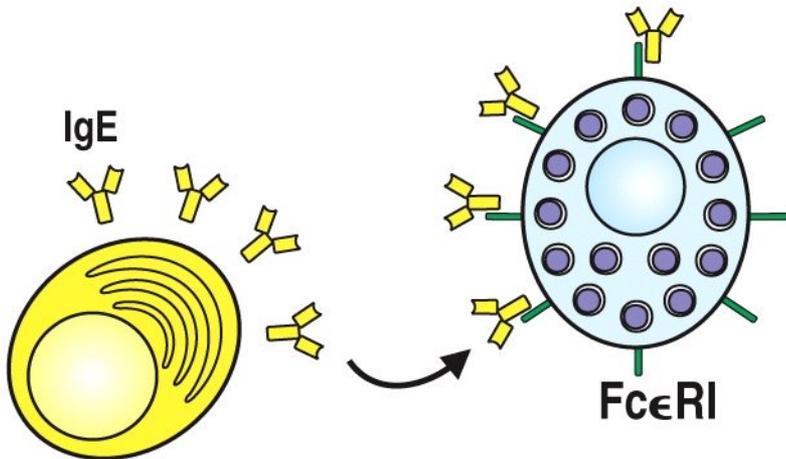


Figure 12-7 Immunobiology, 6/e. (© Garland Science 2005)

**Spätphase** der Typ-I Überempfindlichkeitsreaktion:  
Zytokine wirken: neutrophile und eosinophile Granulozyten werden rekrutiert sowie B-Zellen stimuliert  
IL-3, IL-5, GM-CSF  $\rightarrow$  lokale eosinophile Proliferation  $\rightarrow$  **Entzündung**

# Erkrankungen vom Typ-I

- **Systemische Anaphylaxie -  
anaphylaktischer Schock**
- **Allergische Rhinitis  
(=Heuschnupfen)**
- **Allergische Bindehautentzündung  
(Konjunktivitis)**
- **Allergisches Asthma**
- **Urtikaria (Juckreiz, Rötung und  
Schwellung der Haut)**
- **Ekzem (atopische Dermatitis)**



# Allergie - Umwelteinflüsse

Atopische Allergie und Asthma treten in den wirtschaftlich führenden Regionen der Welt immer öfter auf.

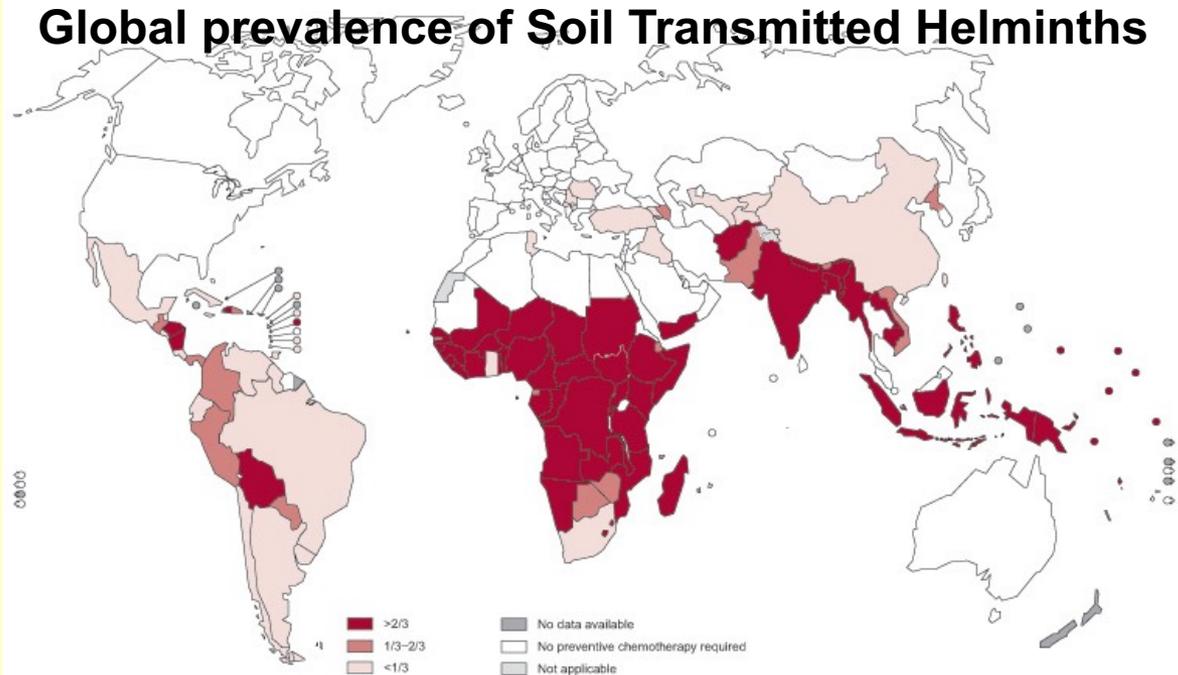
- veränderter Kontakt mit Infektionskrankheiten in der frühen Kindheit („**Hygiene-Theorie**“)
- **Umweltverschmutzung** (verschmutzte Luft in Industriegebieten, Verkehrsverschmutzung)
- Veränderte Allergenkonzentrationen
- Veränderungen bei der **Ernährung** (Chemikalien)

# Global prevalence of Allergic Rhinitis

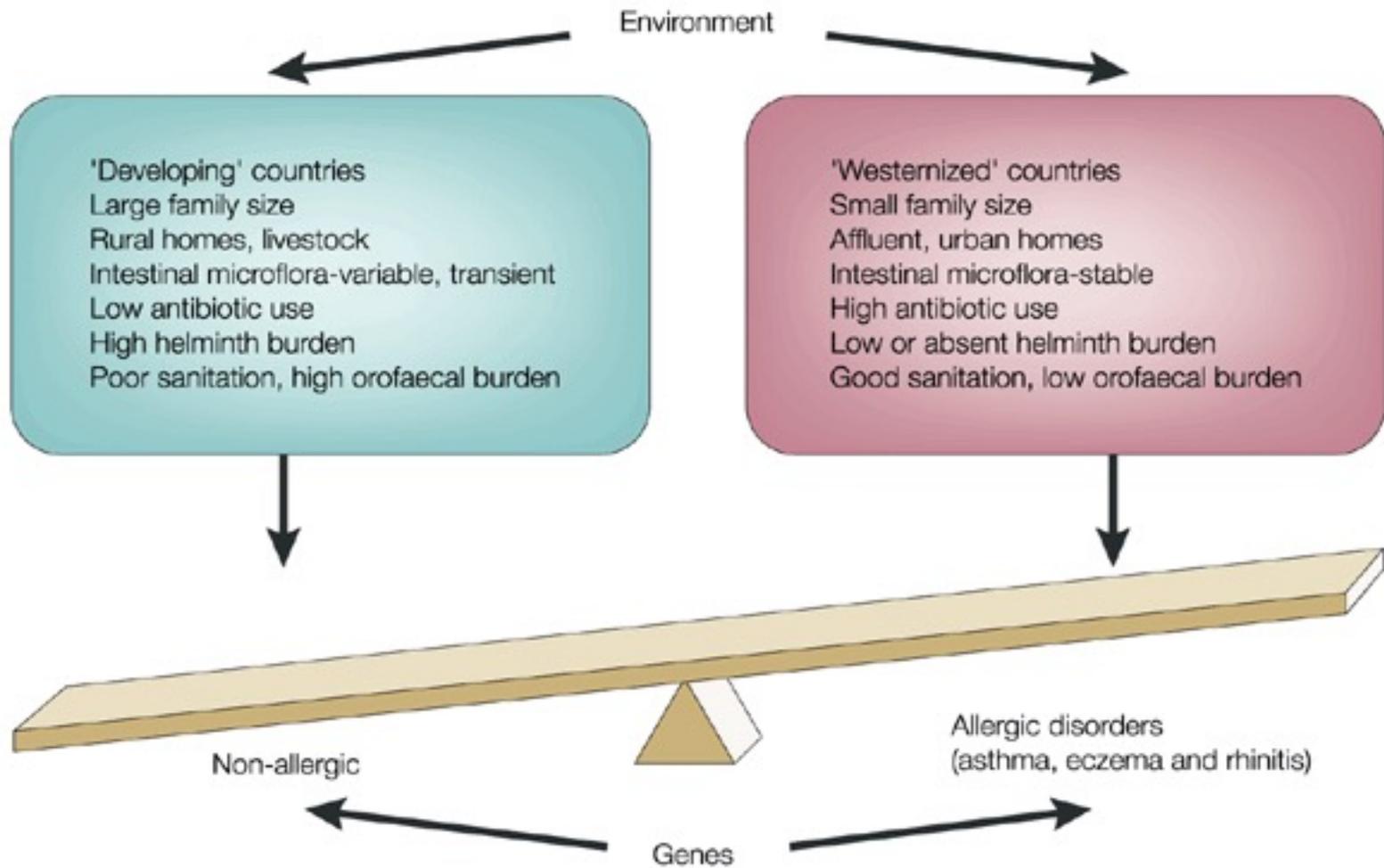


## Hygiene-theory

# Global prevalence of Soil Transmitted Helminths



# Hygiene-theory



Nature Reviews | Immunology



# Atopie 1.

- Höhere Anfälligkeit für allergische Erkrankungen (z.B. Heuschupfen, Asthma)
- Starke IgE-Antworten auf Umweltantigene
- Höherer Gesamtspiegel an IgE und höhere Konzentration von eosinophilen Zellen im Blut als bei anderen Personen

# Atopie 2 - Genetischer Hintergrund

- **Chromosom 11q** - Gen von der  $\beta$ -Untereinheit des hochaffinen Fc $\epsilon$ R - Polymorphismus
- **Chromosom 5q** - Gene von IL-3, IL-4, IL-5, IL-9, IL-13 und GM-CSF  $\longrightarrow$  IgE Isotypenwechsel, Überleben von eosinophilen Granulozyten, Vermehrung von Mastzellen
- Veränderter **IL-4 Promoter** – stärkere Aktivität  
 $\longrightarrow$  erhöhte IgE-Konzentration
- Funktionsgewinnmutation der  $\alpha$ -Untereinheit des **IL-4-Rezeptors** – verstärkte Signalübertragung

# Therapeutische Möglichkeiten

- **Allergenfreie Umgebung**
- **Antihistamine**
- **Desensibilisierung**
- **Membranstabilisierende Medikamente**
- **Unspezifische Immunsuppression**
- **CD23 (hemmender IgE-Rezeptor) - Aktivierung**

# Diagnose:



- 1. Intradermaler Hauttest mit vielfältigen positiven Allergenantworten**
- 2. Laboratorischer-ELISA-Test für Allergen-spezifische IgE-Messung**

# **Überempfindlichkeitsreaktion Typ II**

**Antikörpervermittelte zytotoxische Form**

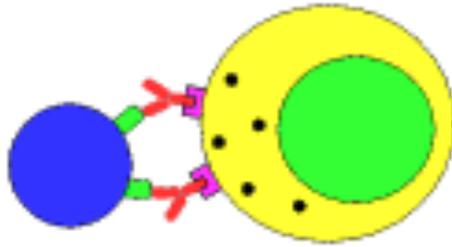
# **Hypersensibilität Typ II – Zytotoxische Reaktionen**

---

- **IgG und IgM gegen zellständige Antigene → Opsonisierung**
- **→ C- und Fc-Rezeptor-vermittelte Phagozytose von Zellen**
- **→ Komplementvermittelte Lyse**
- **→ ADCC: Aktivierung von NK-Zellen, Neutrophilen, Blutplättchen, Eosinophilen, Makrophagen**
- **Beispiele:**
  - **Rh-Antigen**
  - **Transfusionsreaktionen**
  - **Autoimmune hämolytische Anämie**
  - **Hyperakute Transplantatabstoßungen**
  - **Autoimmune Reaktionen gegen Gewebeanigene**

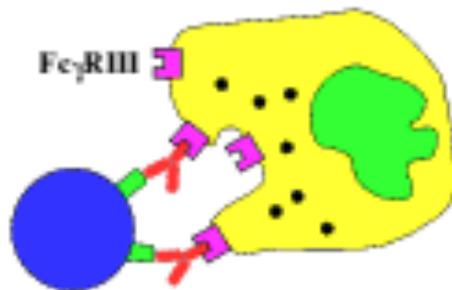
**Die Reaktion erfolgt in einigen Minuten bis einigen Stunden**

# Hypersensibilität Typ II



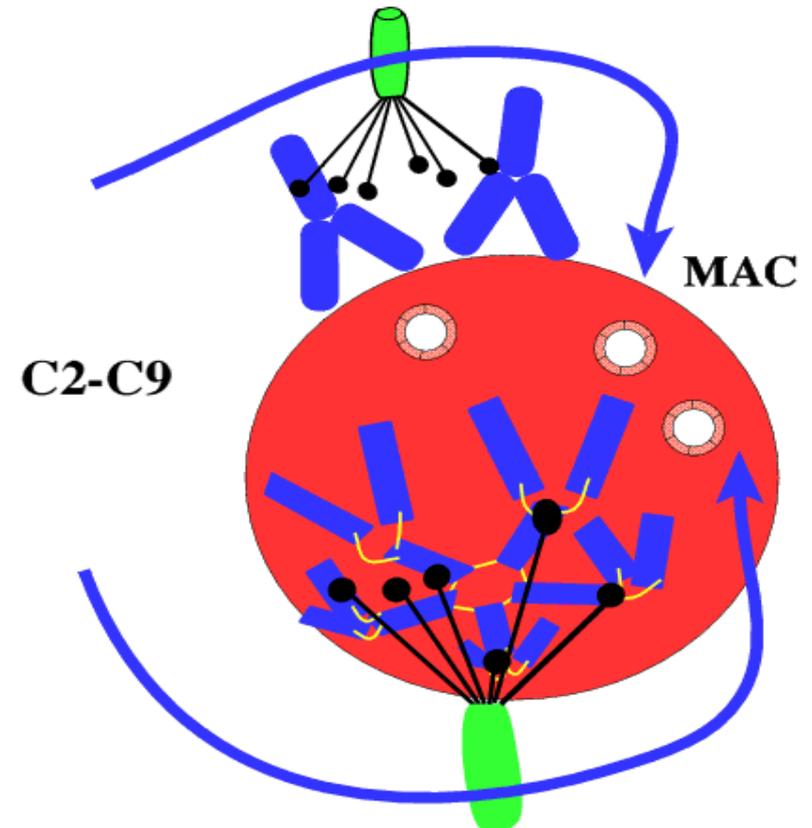
NK-Zelle

Antikörper-vermittelte Zytotoxizität  
**ADCC**

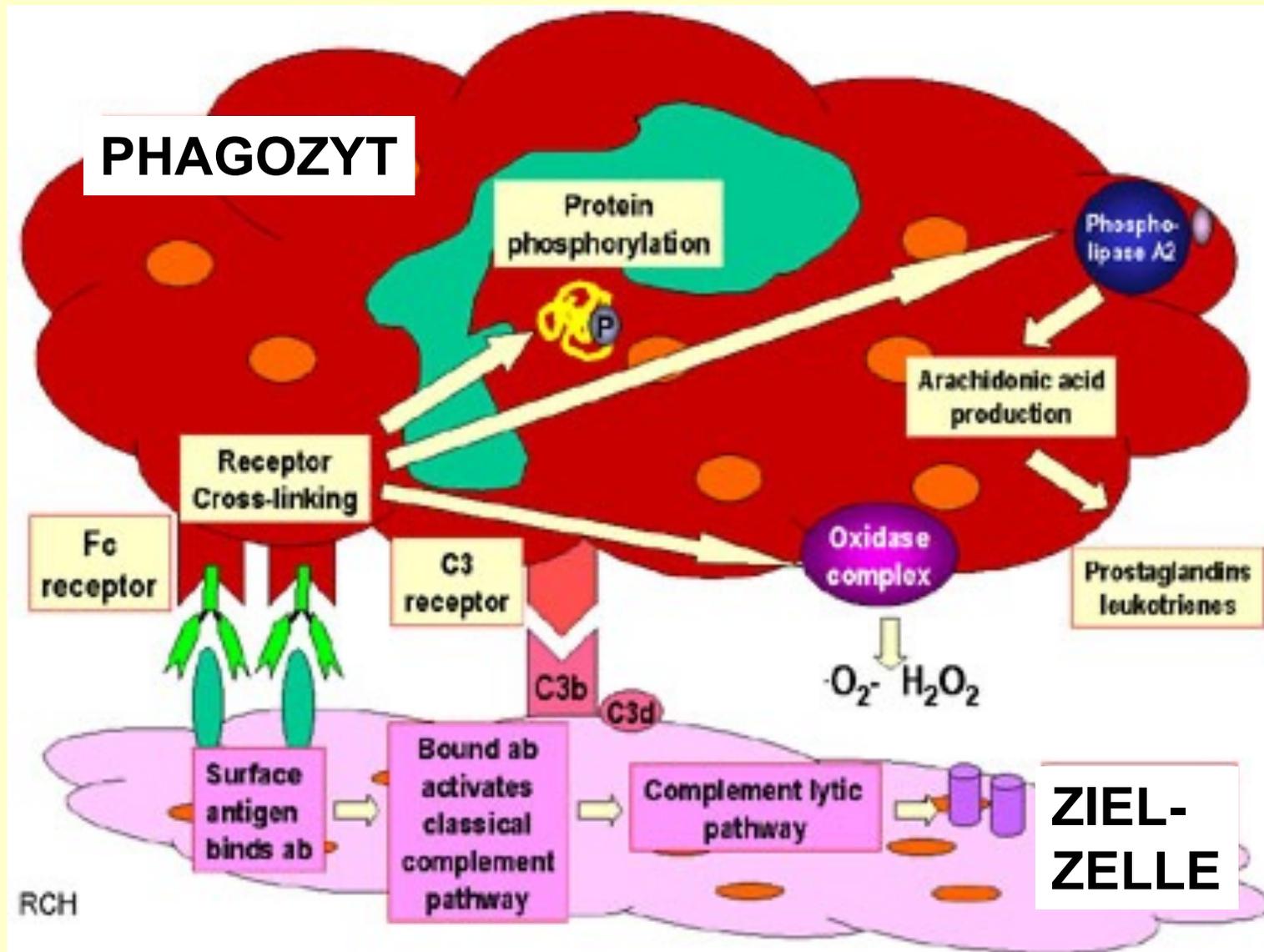


Makrophage

Klassischer Weg der Komplementaktivierung



# Hypersensibilität Typ II

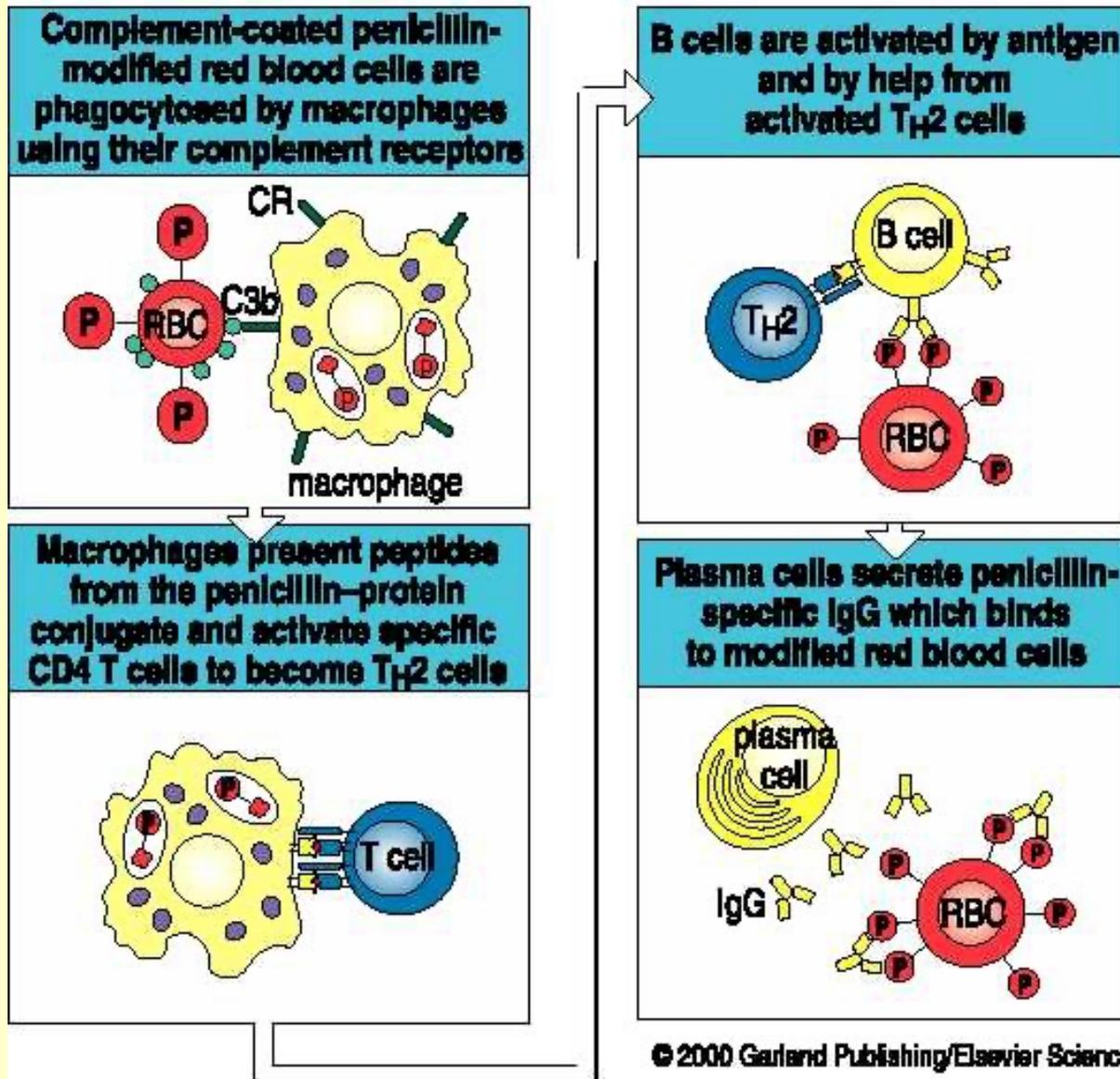


# Erkrankungen vom Typ-II

- Die **Antigene** sind normalerweise Endogene, manchmal exogene Chemikalien (Haptene), die sich an die Zelloberfläche binden können.
- Medikamenteninduzierte hämolytische Anämie, - Granulozytopenie, - Thrombozytopenie
- Antikörper gegen Rezeptoren: Myasthenia gravis, autoimmune Hyperthyroidose
- **Diagnose**: Nachweis der zirkulierenden Antikörper und Immunfluoreszenz von der Biopsie aus der Lesion
- **Therapie**: entzündungshemmende und immunsuppressive Mittel

# Hypersensibilität Typ II

Figure 10.26



# Hypersensibilität Typ II – Zytotoxische Reaktionen – RhD-Antigene **Rh-Inkompatibilität**

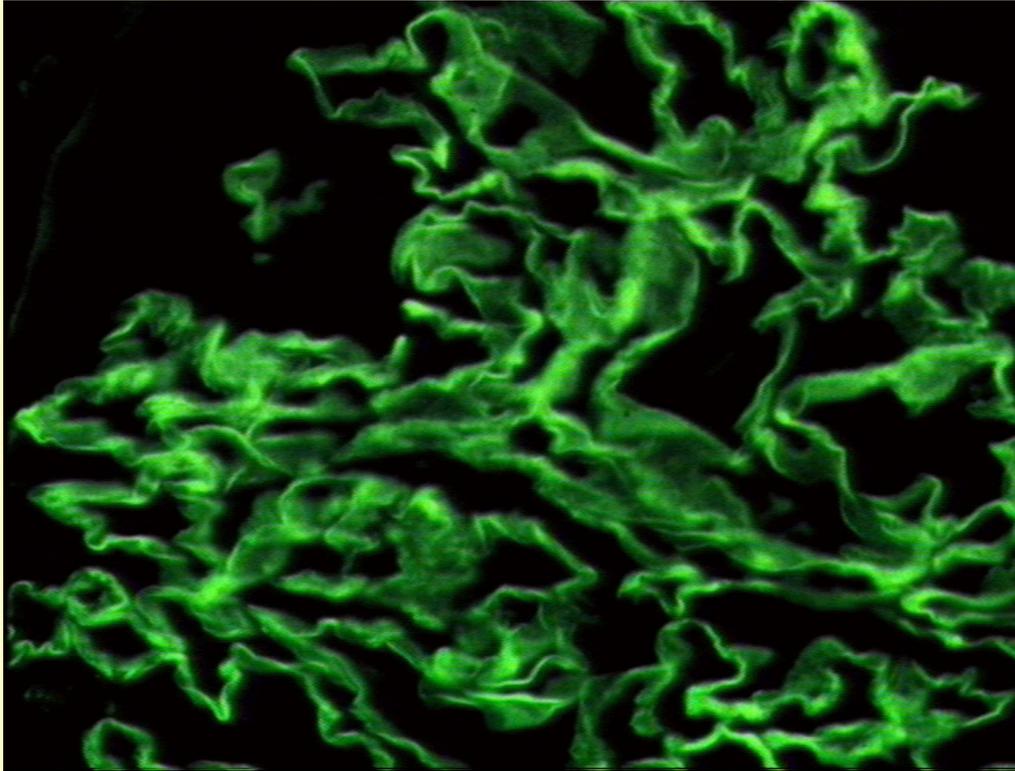
- **Erste Schwangerschaft** – keine Reaktion, aber die Mutter wird gegen RhD-Antigene auf die fötale rote Blutkörperchen sensibilisiert
- **Zweite Schwangerschaft** - mütterliche Anti-RhD-Antikörper mit Komplementaktivierung verursachen die Lyse von fötalen roten Blutkörperchen

## **Erythroblastosis foetalis**

**Prophylaxe** – Eingabe von Anti-RhD-Antikörpern sofort nach der Entbindung, um die RhD+ Zellen zu eliminieren und die Sensibilisierung der Mutter zu verhindern

# Hypersensibilität Typ II

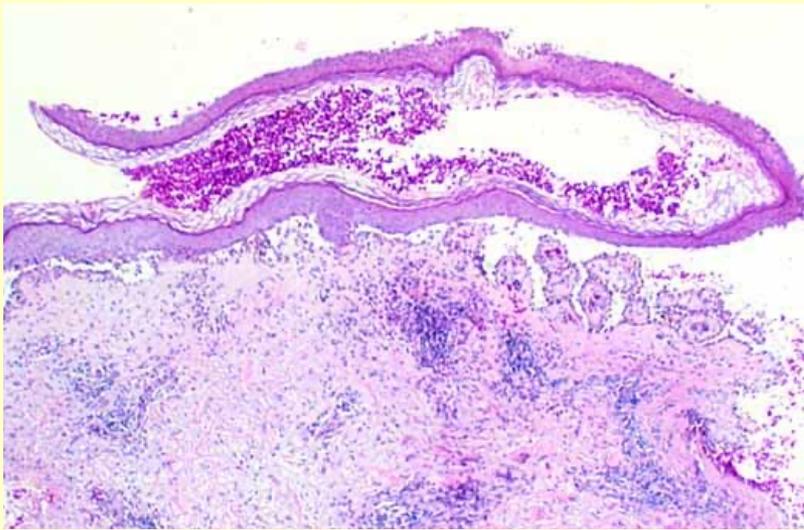
(Anti-GBM Antikörper in der Niere beim Goodpasture's Syndrom)



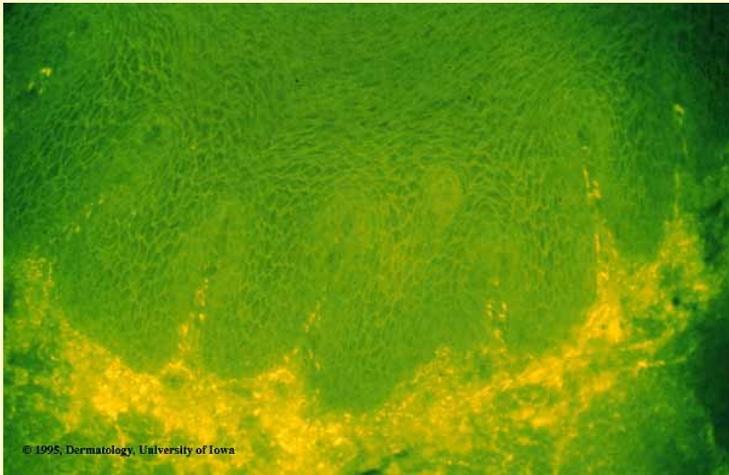
Die pathologische Veränderung enthält Antikörper, Komplementfaktoren und Neutrophile.

Das Färbungsmuster ist normalerweise **glatt** und **linear**.

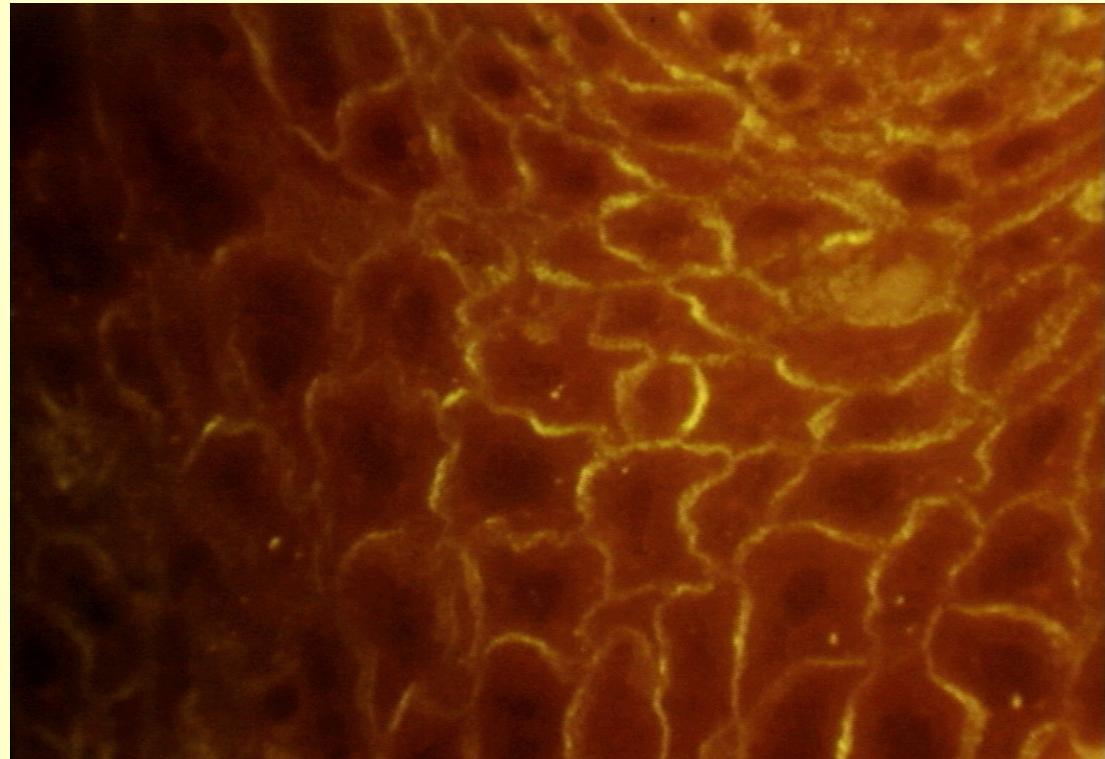
# Pemphigus vulgaris



**Zielantigene:** Hautinterzelluläre  
**Proteine:** Cadherine,  
Desmosome  
**Symptome:** Blasen in der Haut



**Die basale  
Keratinocytschicht und  
die Basalmembran  
werden durch Antikörper  
verankert**



# **Überempfindlichkeitsreaktion Typ III**

**Immunkomplexkrankheit**

# Hypersensibilität Typ III

- **Immunkomplexkrankheit**
- Die **Antigene** sind exogene (chronische bakterielle, virale oder Parasiteninfektionen) oder endogene Gewebemoleküle (Autoimmunkrankheiten)
- **Die Antigene sind löslich.** Die pathologische Veränderung enthält Antikörper, Komplementfaktoren.
- **Gewebeschädigung** wird von Neutrophilen (Entzündung) und Blutplättchen (Thrombose) verursacht.

# Krankheiten

- **Lösliche Immunkomplexe** können sie auslösen. Der Ausgang der Krankheit hängt von der Größe der Immunkomplexe ab
- können **allgemein** (z.B. Serumkrankheit) erscheinen oder in **einzelnen Organen**:
  - Haut (SLE, Arthus-Reaktion)
  - Lungen (Aspergillosis, Farmerslunge)
  - Blutgefäße (Polyarteritis)
  - Gelenke (RA)
  - Nieren (lupus Nephritis)
- **3-10 Stunden** sind für ihre Herausbildung nötig

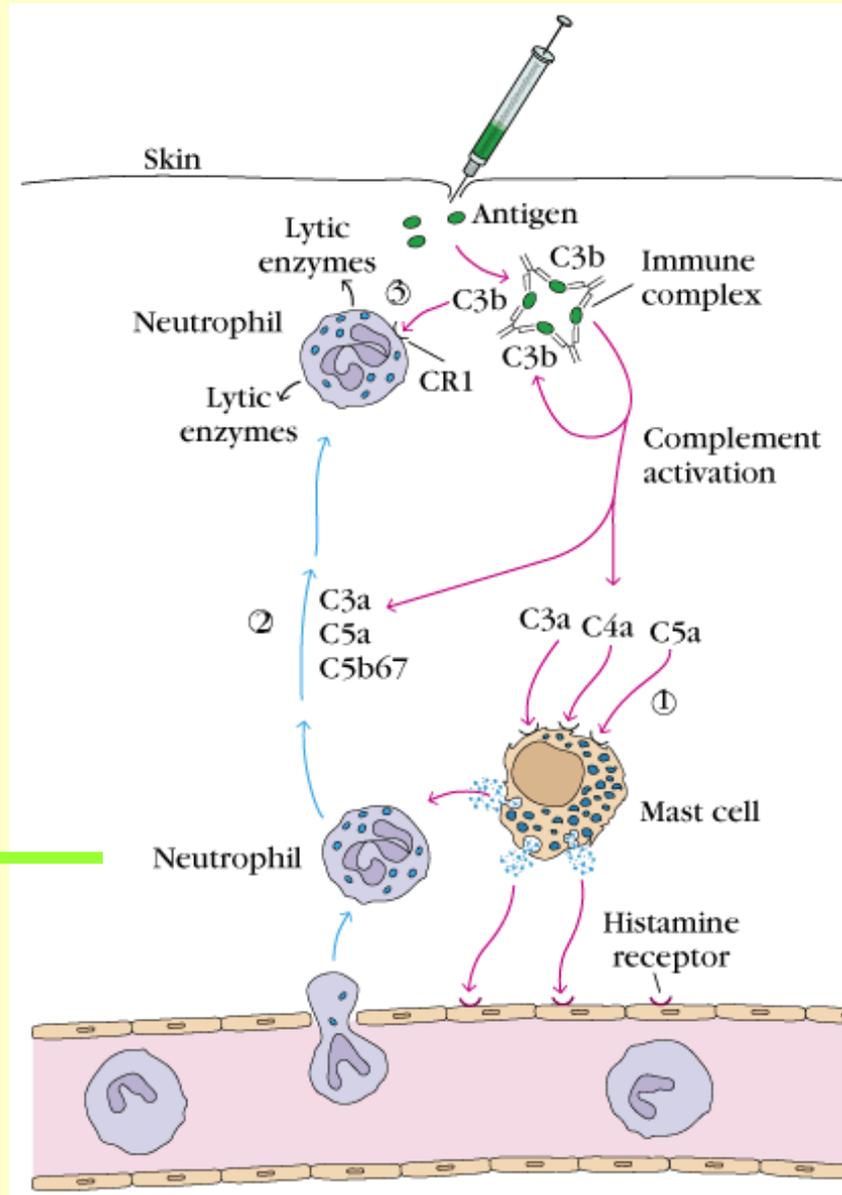
Zur **Diagnose** müssen die Immunkomplexe von Gewebebiopsie durch Immunfluoreszenz nachgewiesen werden.

Dafür ist granulare Färbung charakteristisch.

Im Serum sind Immunkomplexe und niedrige Komplementkonzentration nachweisbar

**Arthus-Reaktion: Immunkomplex-vermittelte Vaskulitis**

# Hypersensibilität Typ III



Lokale  
Entzündung

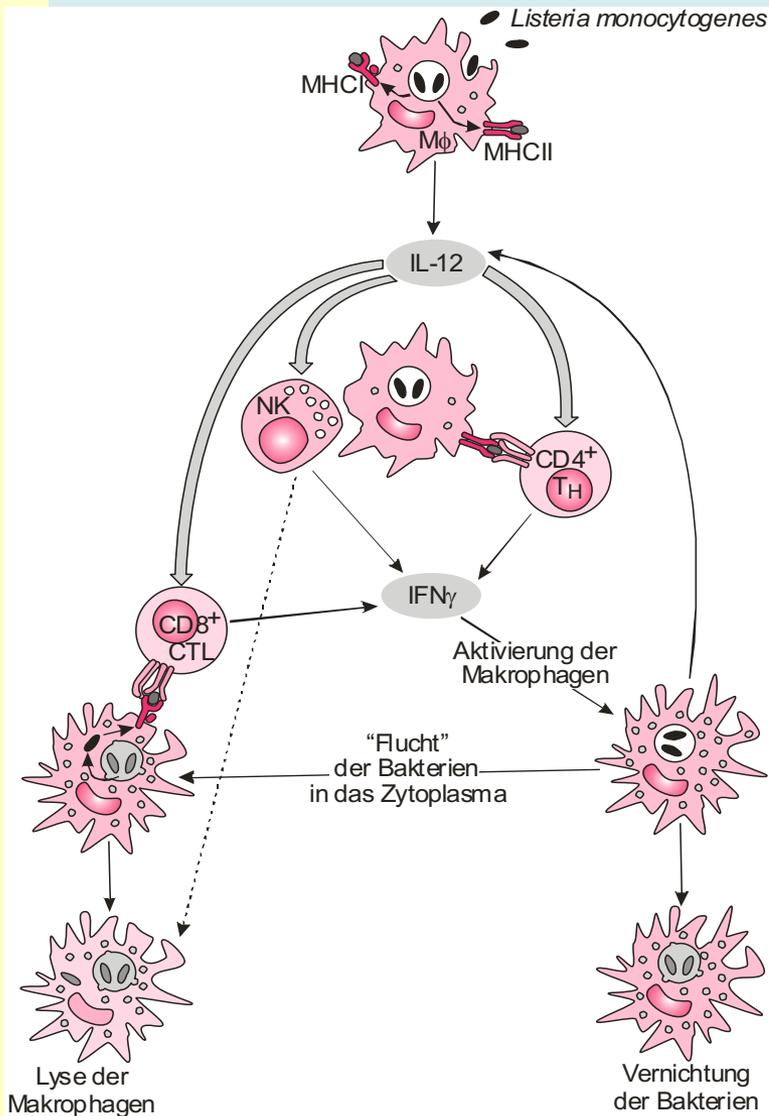
Vaskulitis

# Erkrankungen der Hypersensibilität Typ-III

Krankheit	Symptome	Behandlung
<b>Serumkrankheit (GN, Arthritis, Vaskulitis)</b>	Fieber, Gelenkschmerzen, Dermatitis (Hautentzündung), Lymphadenopathie, Proteinuria, Lungeninsuffizienz	Immunkomplexentfernung, Unterstützung der Funktionen von Organen
<b>Polyarteritis nodosa</b>	Schmerz in verschiedenen Teilen des Körpers, hoher Blutdruck	Immunsuppression
<b>Systemischer Lupus erythematoses, RA</b>	Polyarthralgie (Gelenkschmerzen), Rötung auf dem Gesicht (Hautentzündung), Lungen- und Niereninsuffizienz	Immunsuppression
<b>allergische bronchopulmonare Aspergillose</b>	Asthma, rekurrentes Fieber, Husten, Brustkorbschmerzen	Kortikosteroide gegen Entzündung
<b>einige Krebsarten</b>	ähnlich wie bei Serumkrankheit	Tumorentfernung

Th1-Zell vermittelte zelluläre Immunantwort  
=  
Typ-IV-Überempfindlichkeitsreaktion  
=  
Hypersensibilitätsreaktion vom verzögerten  
Typ-IV  
(DTH)

# Entstehung der Immunantwort gegen ein intrazelluläres Bakterium



1. Makrophagen nehmen die Erreger auf, werden aktiviert und produzieren IL-12

2. IL-12 aktiviert NK-Zellen, Th und Tc-Zellen

3. NK und Th1-Zellen produzieren IFN $\gamma$ , die die infizierte Makrophagen aktivieren und ihre antimikrobielle Aktivität steigern

# Intravesikuläre Pathogene und Kontakt-Antigene induzieren Th1- und Makrophagenaktivierung, die sogenannte DTH

## **Intrazelluläre Bakterien**

*Mycobacterium tuberculosis*

*Mycobacterium leprae*

*Listeria monocytogenes*

*Brucella abortus*

## **Intrazelluläre Fungi**

*Pneumocystis carinii*

*Candida albicans*

*Histoplasma capsulatum*

*Cryptococcus neoformans*

## **Intrazelluläre Parasiten**

*Leishmania sp.*

## **Intrazelluläre Viren**

Herpes simplex virus

Pocken

Masern

## **Kontaktantigene**

Picrylchloride

Haarfarbstoffe

Nickelsalze

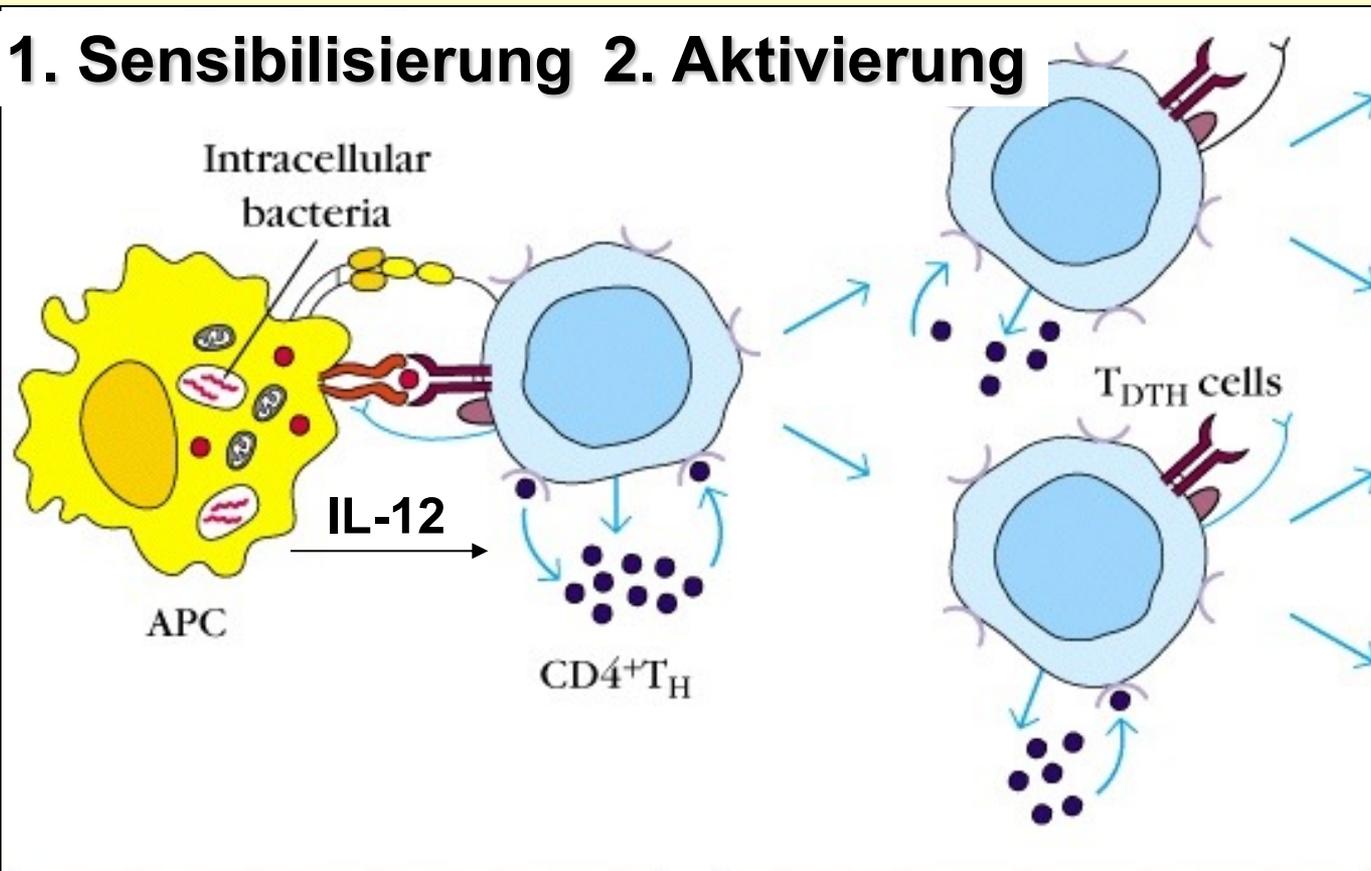
Formaldehyd

Gift-Efeu

Gift-Eiche

# 1. und 2. Phase der Reaktion vom verzögerten Typ (DTH)

## 1. Sensibilisierung 2. Aktivierung

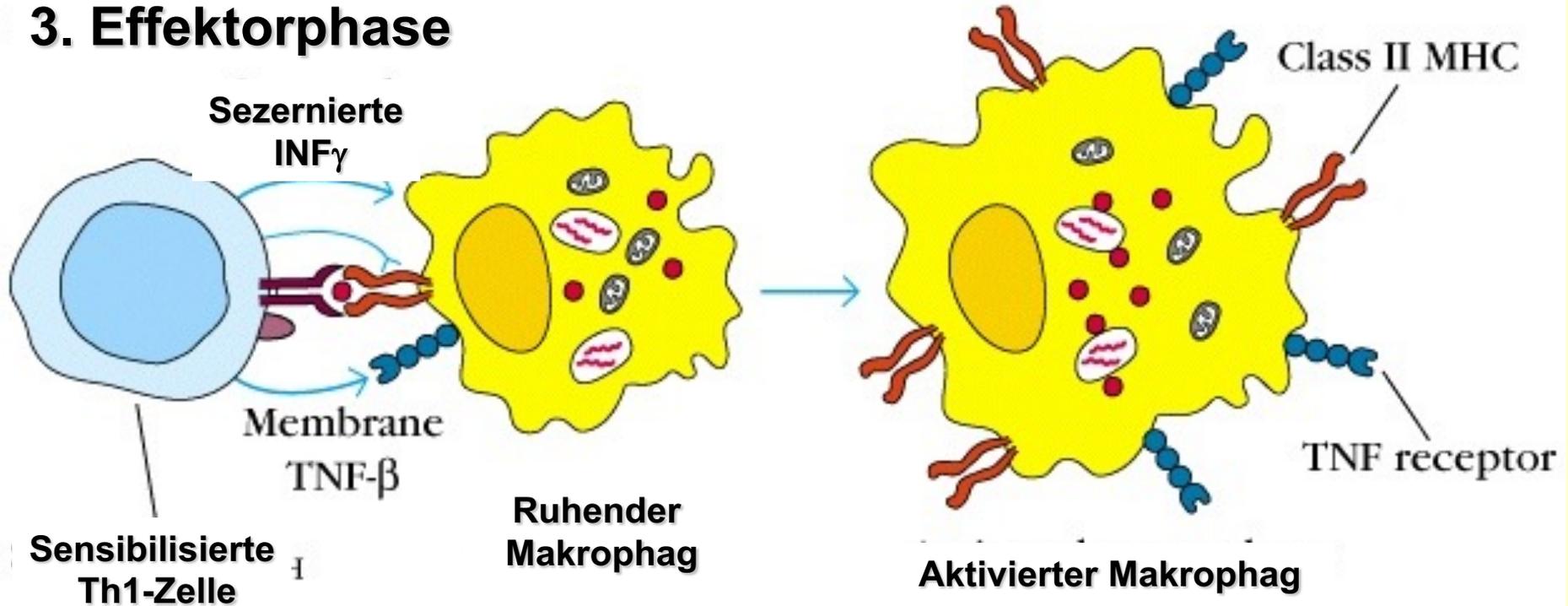


Antigen-presenting cells:  
Macrophages  
Langerhans cells

$T_{DTH}$  cells:  
 $T_H$  1 cells (generally)  
 $CD8^+$  cells (occasionally)

# Nach dem zweiten Antigenkontakt

## 3. Effektorphase



### Th1-Produkte:

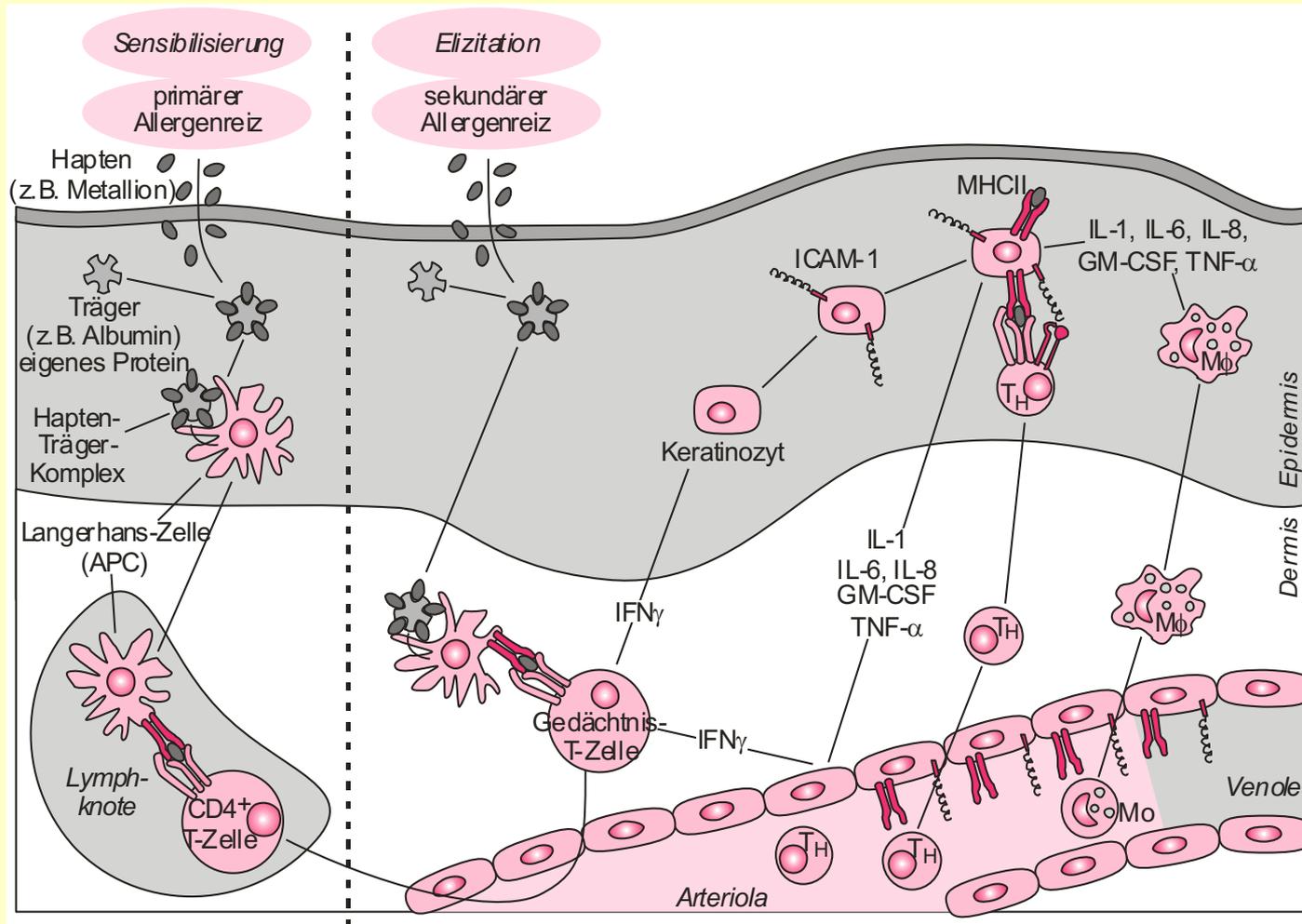
Cytokines:  $\text{IFN}\gamma$ ,  $\text{TNF}\beta$ , IL-2,  
IL-3, GM-CSF

Chemokines: IL-8, MCAF, MIF

### Wirkungen der Makrophagenaktivierung:

- ↑ Class II MHC molecules
- ↑ TNF receptors
- ↑ Oxygen radicals
- ↑ Nitric oxide

# Entstehung der Kontaktdermatitis, Ekzem – Typ IV der Hypersensibilitätsreaktion



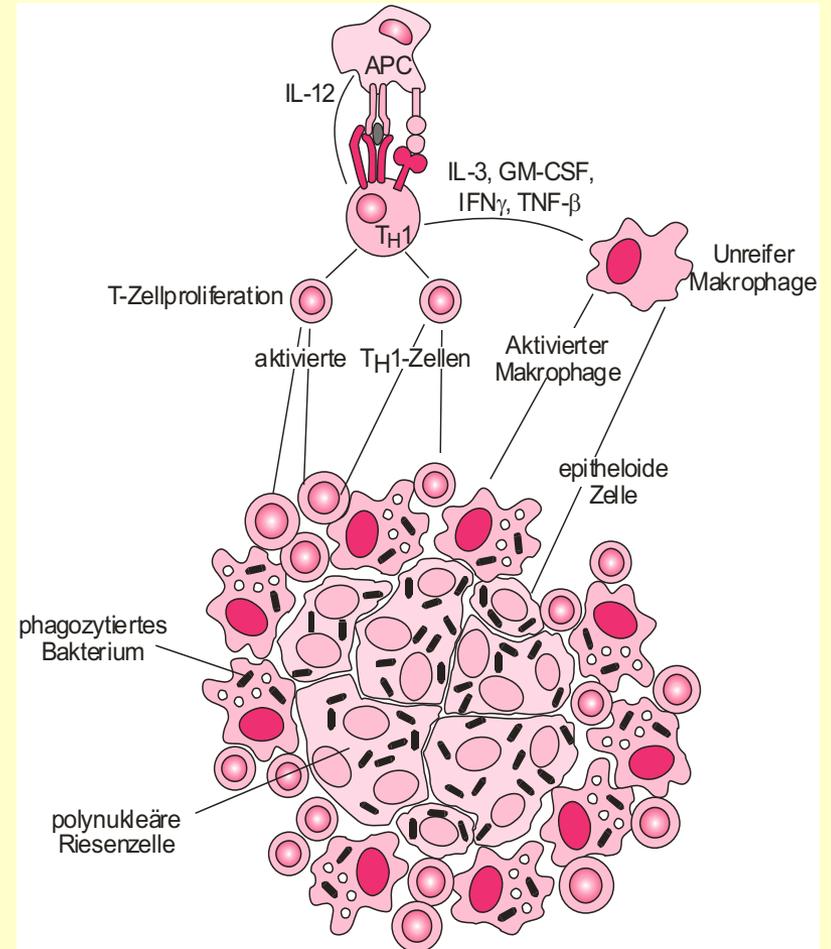
# Phasen der Hypersensibilitätsreaktion vom verzögerten Typ (DTH)

- **Sensibilisierungsphase**: dauert 1-2 Wochen nach dem Primärkontakt mit dem Antigen.  
APC (meistens Makrophagen oder Langerhans-Zellen) produzieren IL-12, um Th-Zellen zu induzieren.
- **Aktivierungsphase**: Th1-Aktivierung, Proliferation, manchmal CD8+ CTL-Aktivierung.
- **Effektorphase**: der sekundäre Antigenkontakt verursacht Th1-Gedächtniszell-Aktivierung, die Zytokine sezernieren (24h), und die dann Makrophagen aktivieren (Spitze in 48-72 Stunden).  
Nur 5% der Leukozyten sind T-Zellen, 95% sind unspezifisch.

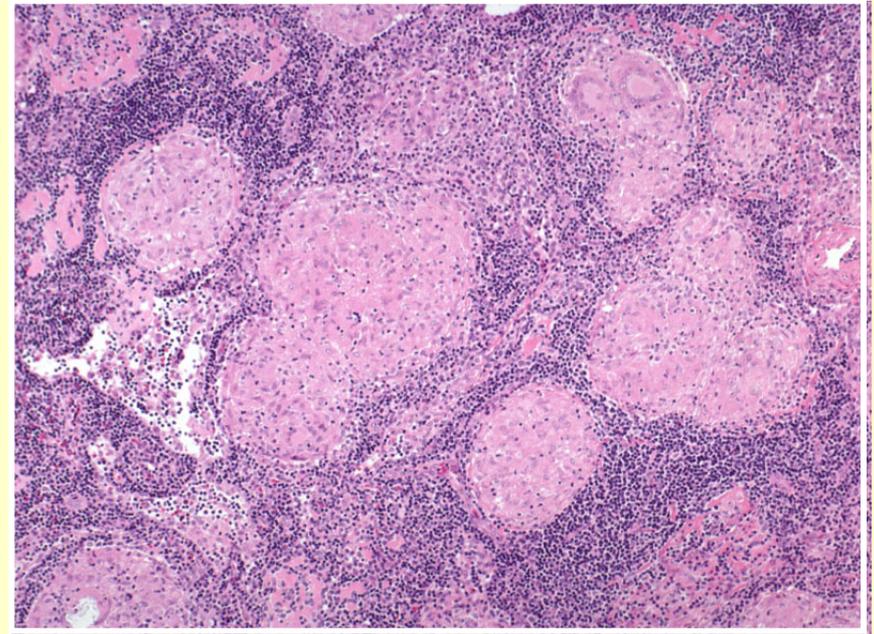
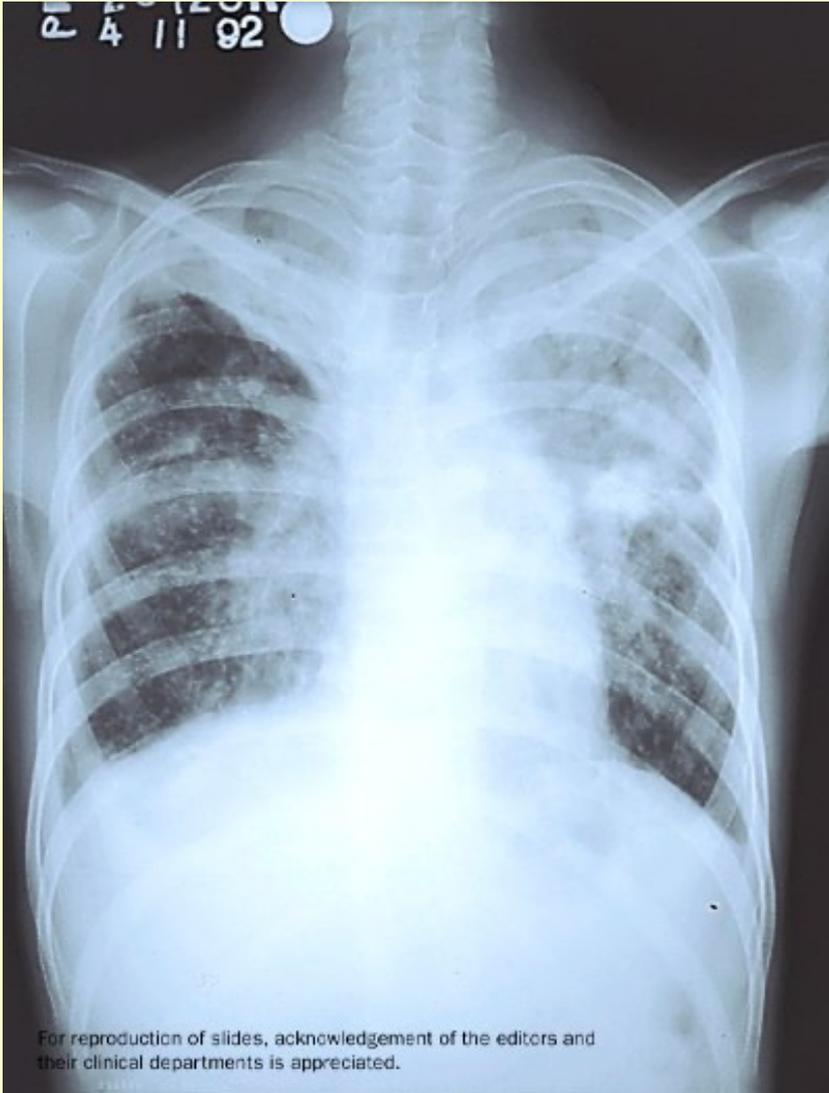
# 4. Phase der Hypersensibilitätsreaktion vom verzögerten Typ (Typ IV = DTH)

- Granulomatöse Reaktion: wenn intravesikuläre Krankheitserreger in den Zellen überleben (persistieren), lösen eine verlängerte DTH-Antwort aus – **chronische Infektion**
- → die ununterbrochene Makrophagenaktivierung durch kontinuierliches Zytokin- und Wachstumsfaktorproduktion führt zur Entstehung eines **Granuloms (Knötchens)**.
- Riesenzelle, epitheloide Zelle  
Gewebeschädigung, Necrosis, Fibrose.

## Struktur eines Granuloms



# Typ IV der Hypersensibilität – Struktur des Granuloms bei Tuberkulose



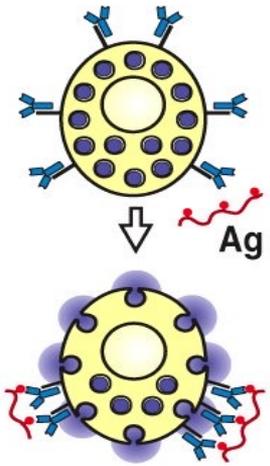
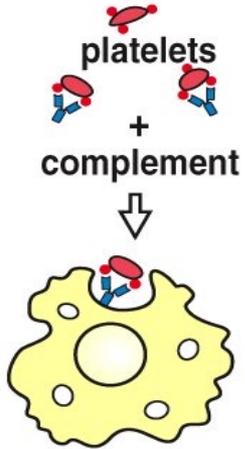
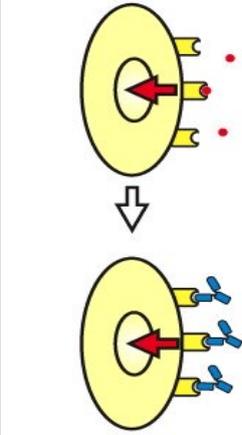
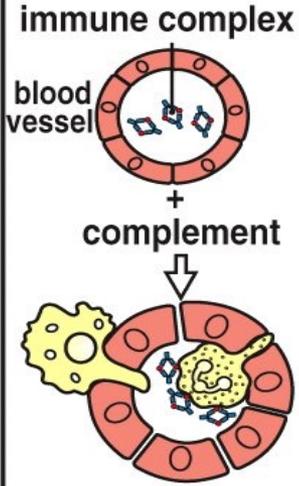
	Type I	Type II		Type III
Immune reactant	IgE	IgG		IgG
Antigen	Soluble antigen	Cell- or matrix-associated antigen	Cell-surface receptor	Soluble antigen
Effector mechanism	Mast-cell activation	Complement, FcR <sup>+</sup> cells (phagocytes, NK cells)	Antibody alters signaling	Complement, Phagocytes
				
Klinische Beispiele	Heuschnupfen Asthma bronchiale Anaphylaxie	Penicillin-Allergie Morbus haemolyticus neonatorum	Chronische Urtikaria (Juckreiz) Antikörper gegen FcεR1	Serum-Krankheit, Arthus-Reaktion, SLE

Figure 12-2 part 1 of 2

	Type IV		
Immune reactant	T <sub>H</sub> 1 cells	T <sub>H</sub> 2 cells	CTL
Antigen	Soluble antigen	Soluble antigen	Cell-associated antigen
Effector mechanism	Macrophage activation	IgE production, Eosinophil activation, Mastocytosis	Cytotoxicity
	<p>IFN-<math>\gamma</math> T<sub>H</sub>1</p> <p>chemokines, cytokines, cytotoxins</p>	<p>IL-4 IL-5 T<sub>H</sub>2 eotaxin</p> <p>cytotoxins, inflammatory mediators</p>	<p>CTL</p>
Klinische Beispiele	Kontakt-dermatitis Tuberkulin-Reaktion	Chronisches Asthma Chronischer Heuschnupfen	Kontakt-dermatitis, Zöliakie, RA M. Crohn

Figure 12-2 part 2 of 2