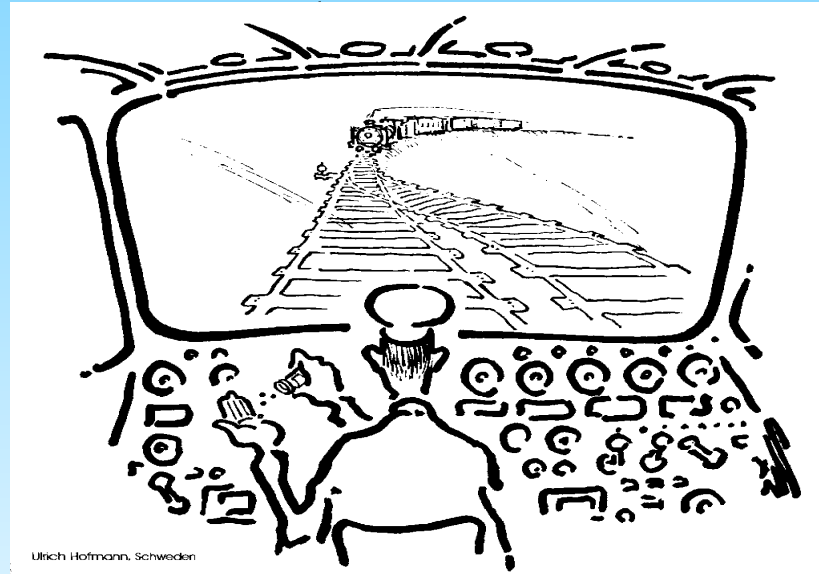


# E. Schnieder: NEUE UND HERKÖMMLICHE MAßE ZUR QUANTIFIZIERUNG DES RISIKOS IM EISENBAHNVERKEHR



- Risiko
- Akzeptanzkriterien
- Definition der Risikomaße
- Anwendungsbeispiel Bahnübergang
- Zusammenfassung



Bodensee, 2001



Rom, 2003



Südosten Spaniens, 2003

## Größe

## Maß

**Dunkelheit**



**Helligkeit in [Lumen]**

**Stille**



**Lautstärke in [dB]**

**Stillstand**



**Geschwindigkeit**

**Stabilität**



**Bewegung**

**Gesundheit**



**Krankheitstage**

**Qualität**



**Ausfallrate**

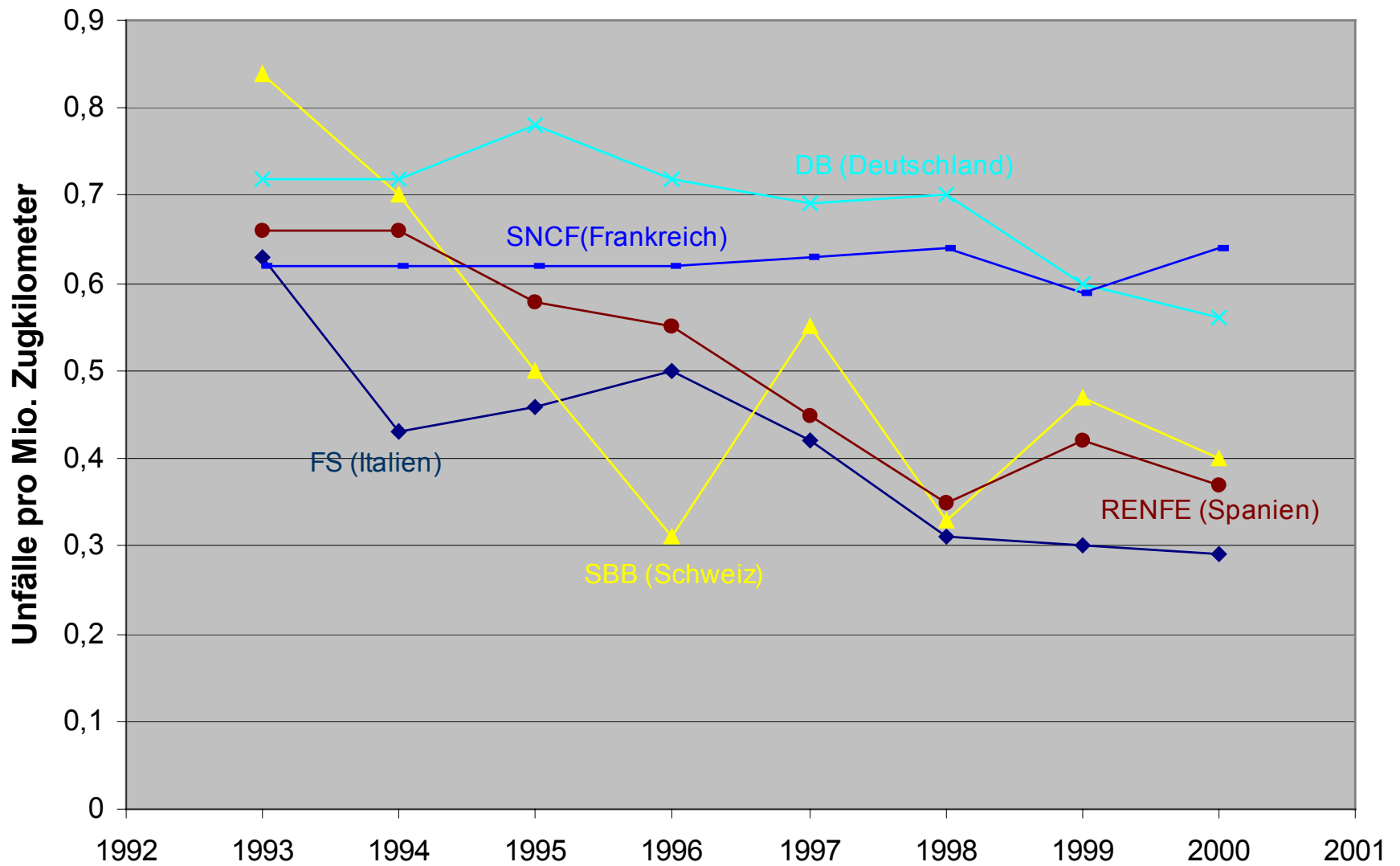
**Sicherheit**



**Risiko**

Begriff	(Verkehrs-) Sicherheit
Umfang	„Das Nichtvorhandensein eines Schadensrisikos“
Inhalt	Schadenausmaß (D) X Wahrscheinlichkeit (p)/[Kontext]
Größen	absolute Größen
Ausprägung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anzahl der Toten, Verletzten, Sachschäden, Umweltschäden</li> <li>- Schadenskosten</li> </ul>
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Bezugsgrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ursachen</li> <li>- Zeitraum</li> <li>- Bereich</li> <li>- Leistung</li> <li>- Situation</li> <li>- Kosten</li> <li>- Betroffene               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Personen</li> <li>- Güter</li> <li>- Umwelt</li> </ul> </li> </ul> </div> <div style="width: 45%;"> <p>relative Größen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mortalität [Tote/Jahr]</li> </ul> </div> </div>

<b>Risiko bzgl. der Unfälle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl der Unfälle per Verkehrsmittelkilometer</li> <li>• Anzahl der Toten und Verletzten per Verkehrsmittelkilometer</li> </ul>
<b>Risiko bzgl. der Beinaheunfälle (Beispiel Eisenbahn)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl der Schienenbrüche, Signalfehler, usw. per Verkehrsmittelkilometer</li> <li>• Anzahl SPAD per Verkehrsmittelkilometer</li> <li>• Anzahl der Rad- und Achsbrüche im Betrieb</li> </ul>
<b>Risiko bzgl. der Unfallfolgen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unfallkosten per Verkehrsmittelkilometer</li> <li>• Anzahl der verlorenen Arbeitsstunden der betroffenen Personen</li> </ul>
<b>Mortalität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl der Gestorbenen im Zeitraum / Anzahl der Individuen der Population im Zeitraum</li> </ul>
<b>LQI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Life Quality Index</li> </ul>
<b>Volkswirtschaftliche Kosten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wiederherstellungskapital</li> <li>• Humankapital</li> <li>• Zahlungsbereitschaft</li> </ul>
...	...



[Quelle: Computers in Railways IX, Dresden 2004]

## Relative Unfalldaten im europäischen Schienenverkehr

Technische Universität Braunschweig

Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik

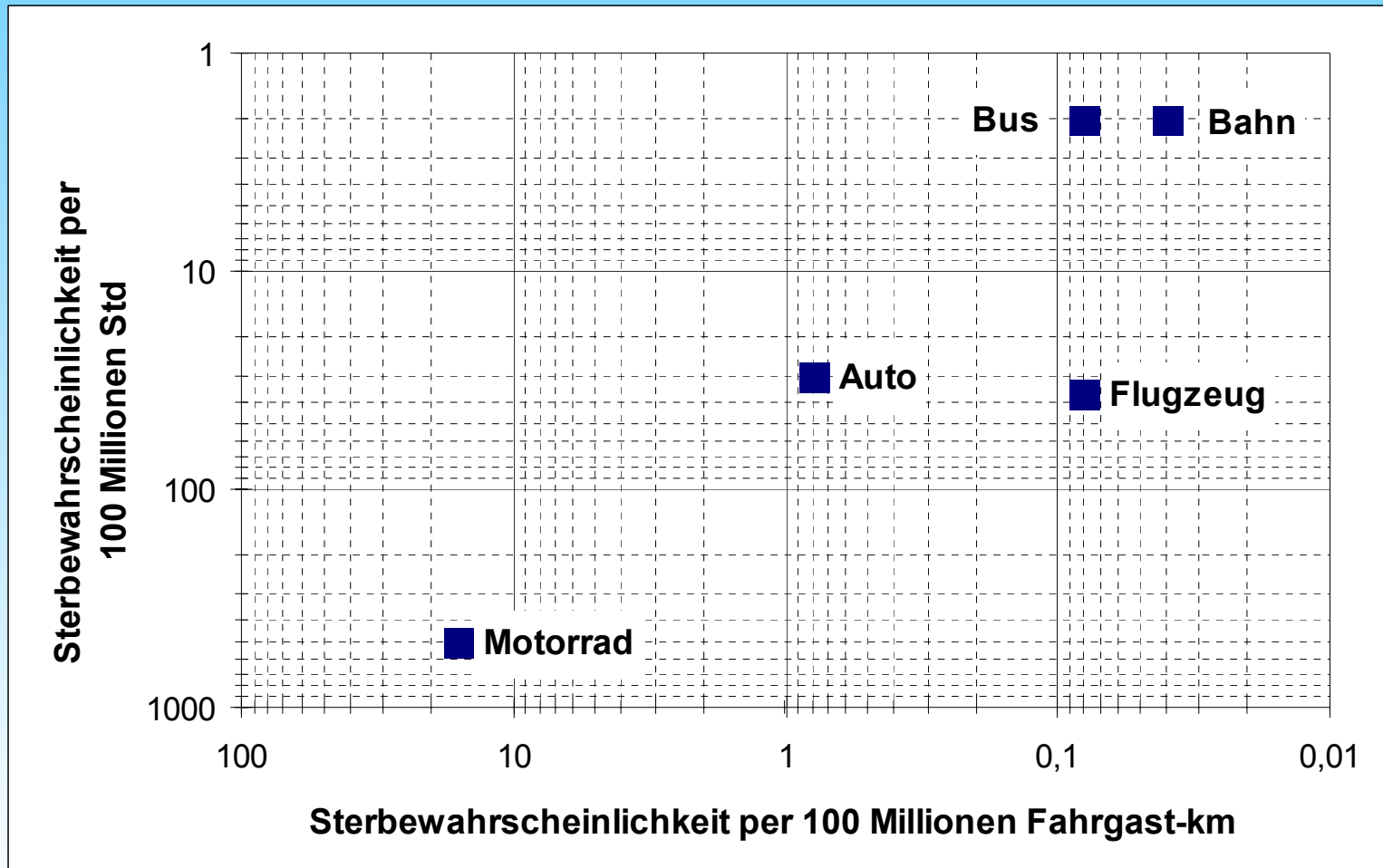
IVA

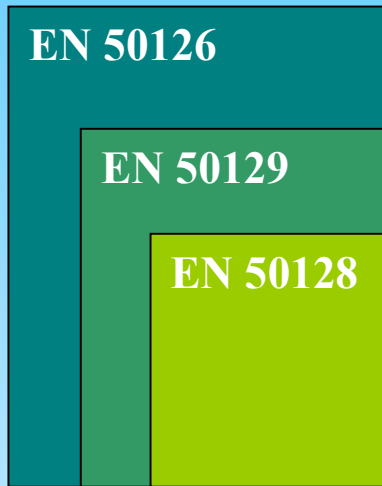
## Reisezeit versus Reiseweg

Verkehrsmittel	Sterbefälle pro 100 Millionen Stunden Reisezeit der Fahrgäste	Sterbefälle pro 100 Millionen Kilometer Reisewegs der Fahrgäste
Motorrad	500	16
Auto	30	0,8
Bus	2	0,08
Flugzeug	36,5	0,08
Bahn	2	0,04

Quelle: SNCF

# Reisezeit versus Reiseweg





## CENELEC Normen für Bahnanwendungen:

Legislativer Hintergrund im Bereich der  
Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit,  
Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS)

- **Sicherheit:** Das Nichtvorhandensein eines unzulässigen Schadensrisikos [EN 50126]
- Vorgabe des globalen Sicherheitsniveaus durch Sicherheitskriterien
  - GAMAB
  - MEM
  - ALARP

**Risiko** – Die a) Wahrscheinlichkeit  $p$  bzw. b) Häufigkeit des Auftretens einer *Gefahr*, die einen Schaden verursacht (pro Zeiteinheit, für eine bestimmte Grundgesamtheit), sowie den Schweregrad eines Schadens ( $D$ )

$$a) R = p \cdot D \qquad b) \quad r = \frac{dR}{dt} = D \frac{dp}{dt}$$

**Gefahr** (Hazard) – eine physikalische Situation, die potentiell einen Schaden für den *Menschen* beinhaltet

**Menschliche Sterblichkeit (Mortalität)**      **→**      **Risikomaß der Sicherheit im Eisenbahnverkehr**

**Mortalität** (med.) - Anteil der Individuen einer definierten Population, die in einem bestimmten Zeitraum (meist 1 Jahr) sterben:

**Kollektives Risiko** – absolut oder bezogen auf eine Personengruppe  
*[Tote pro Person und Jahr]*

**Individuelles Risiko** – bezogen auf ein Individuum  
*[Tote pro Person und Jahr]*

Häufigkeit der Gefahrenfälle	Risikostufen			
häufig	unerwünscht	intolerabel	intolerabel	intolerabel
wahrscheinlich	tolerabel	unerwünscht	intolerabel	intolerabel
gelegentlich	tolerabel	unerwünscht	unerwünscht	intolerabel
selten	vernachlässigb.	tolerabel	unerwünscht	unerwünscht
unwahrscheinlich	vernachlässigb.	vernachlässigb.	tolerabel	tolerabel
unvorstellbar	vernachlässigb.	vernachlässigb.	vernachlässigb.	vernachlässigb.
	unbedeutend	marginal	kritisch	katastrophal
	Gefahrenstufen			

# GAMAB (Globalement Au Moins Aussi Bon)

*neue Systeme der Eisenbahn müssen das gleiche Niveau des Globalrisikos aufweisen, wie die vergleichbaren bereits existierenden Systeme (entspricht auch EBO §2).*

*Beispiel:*

In Deutschland gibt es etwa **28 000** Bahnübergänge mit:

- ca. **500** Unfällen/Jahr
- ca. **100** Toten/Jahr



→ Tolerierbares Risiko:  $TR_{\text{GAMAB}} = 3,57e-3$  Tote/Jahr/Bahnübergang

→ Mortalität per Unfall (Fatalitätsfaktor):  $C_F = 0,2$  Tote/Unfall

## Akzeptanzkriterien

Kollektives Risiko – GAMAB [EN 50126]

## ALARP (As Low As Reasonably Possible)

*unterscheidet drei verschiedene Zielgruppen der Individuen, die dem Risiko des Eisenbahnsystems ausgesetzt sind (Mitarbeiter, Pendler, Anwohner).*

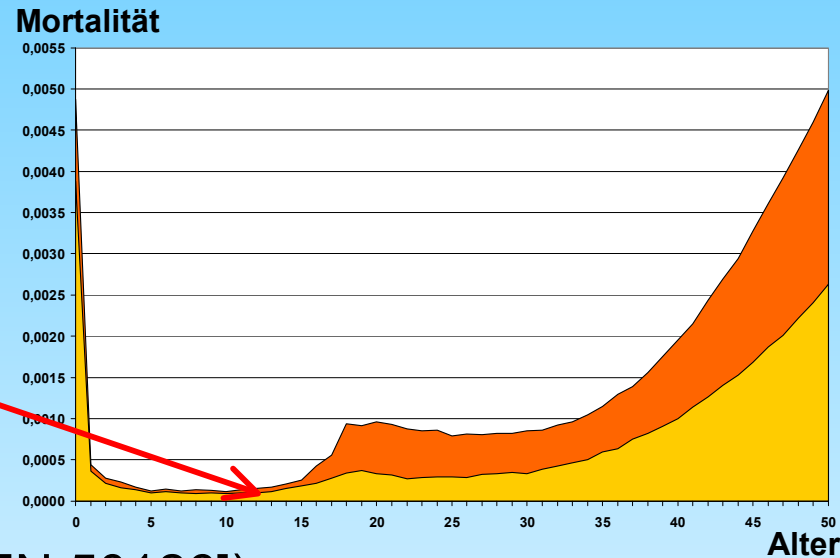
*Für die Zielgruppen wird jeweils die obere Grenze des zulässigen Risikos (darf in keinem Fall überschritten werden), sowie die untere Grenze (ist immer akzeptiert) definiert [Tote/(Person x Jahr)].*

Gruppe	Obere Toleranzgrenze	Immer akzeptiert	Zielwert
Mitarbeiter	10e-3	10e-6	10e-4
Pendler	10e-4	10e-6	10e-5
Anwohner	10e-4	10e-6	10e-5

Im Rahmen des „ALARP-Akzeptanzbandes“ ist anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse zu entscheiden.

Das Gesamtrisiko der technischen Systeme, die auf ein Individuum wirken, darf höchstens den Wert minimaler menschlicher Sterblichkeit (*mem*) betragen

$$R_{\text{mem}} = 2e-4 \text{ Tote}/(\text{Person} \times \text{Jahr})$$



**MEM** (für technische Anwendungen [EN 50126])

Quelle: destat

Annahme: Eine Person kann gleichzeitig bis auf 20 technischen Systemen ausgesetzt werden

→ Tolerierbares Risiko pro System:

$$TR_{\text{MEM}} = R_{\text{mem}}/20 = 1e-5 \text{ Tote}/(\text{Person} \times \text{Jahr})$$

- **NMAU** – Nicht mehr als unvermeidbar
- **MGS** – Mindestens gleiche Sicherheit
- **LQI** – Life Quality Index

### Gemeinsames Merkmal:

Direkte Abhängigkeit des Risikos mit der Aussetzungsdauer der Gefährdeten.

### Schlussfolgerung:

Risiko hängt sowohl von der **Sicherheit** als auch von der **Verfügbarkeit** des Eisenbahnsystems ab.

$M_{HM}$	mittlere menschliche Mortalität
$T_H$	mittlere menschliche Lebensdauer
$M_{TM}$	mittlere verkehrssystembedingte Mortalität
$T_{HT}$	mittlere menschliche Lebensdauer Menschen im Verkehr
$\Delta T_H$	Verkürzung der menschlichen Lebensdauer

$$\Delta T_{HT} = T_H - T_{HT}$$

$$T_H = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t M_H(\tau) d\tau} dt = \frac{1}{M_{HM}} = 78,34 \text{ Jahre}$$

$$T_{HT} = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t (M_H(\tau) + M_T(\tau)) d\tau} dt = \int_0^{\infty} \left( e^{-\int_0^t M_H(\tau) d\tau} \right) \left( e^{-\int_0^t M_T(\tau) d\tau} \right) dt = \frac{1}{M_{HM} + M_{TM}}$$

## Definition der Risikomaße

Verkürzung menschlicher Lebensdauer

$\Delta\tau \in [0,1]$  **relative Lebenszeitverkürzung**

$$\Delta\tau = \frac{\Delta T_{HT}}{T_H} = \frac{M_{TM}}{M_{HM} + M_{TM}}$$

$pS_H \in [0, \infty)$  **menschliches Sicherheitspotenzial**

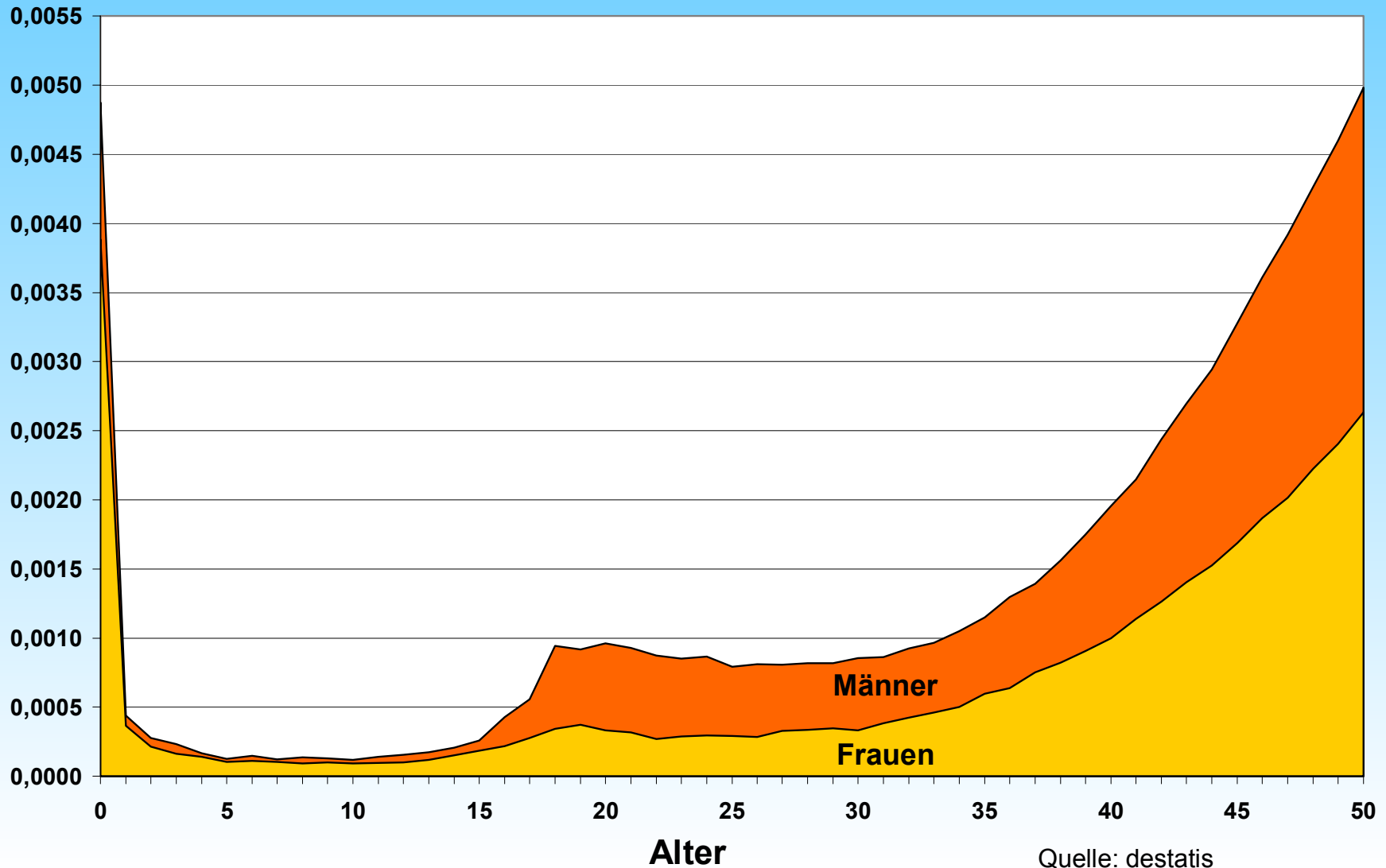
$$pS_H = -\lg(\Delta\tau) = -\lg \frac{M_{TM}}{M_{HM} + M_{TM}}$$

**Für den Fall:**  $M_{HM} \gg M_{TM}$

$$pS_H = -\lg \frac{M_{TM}}{M_{HM}}$$

# Mortalität

$$\left[ \frac{\text{Tote}}{\text{Jahr} \cdot \text{Person}} \right]$$



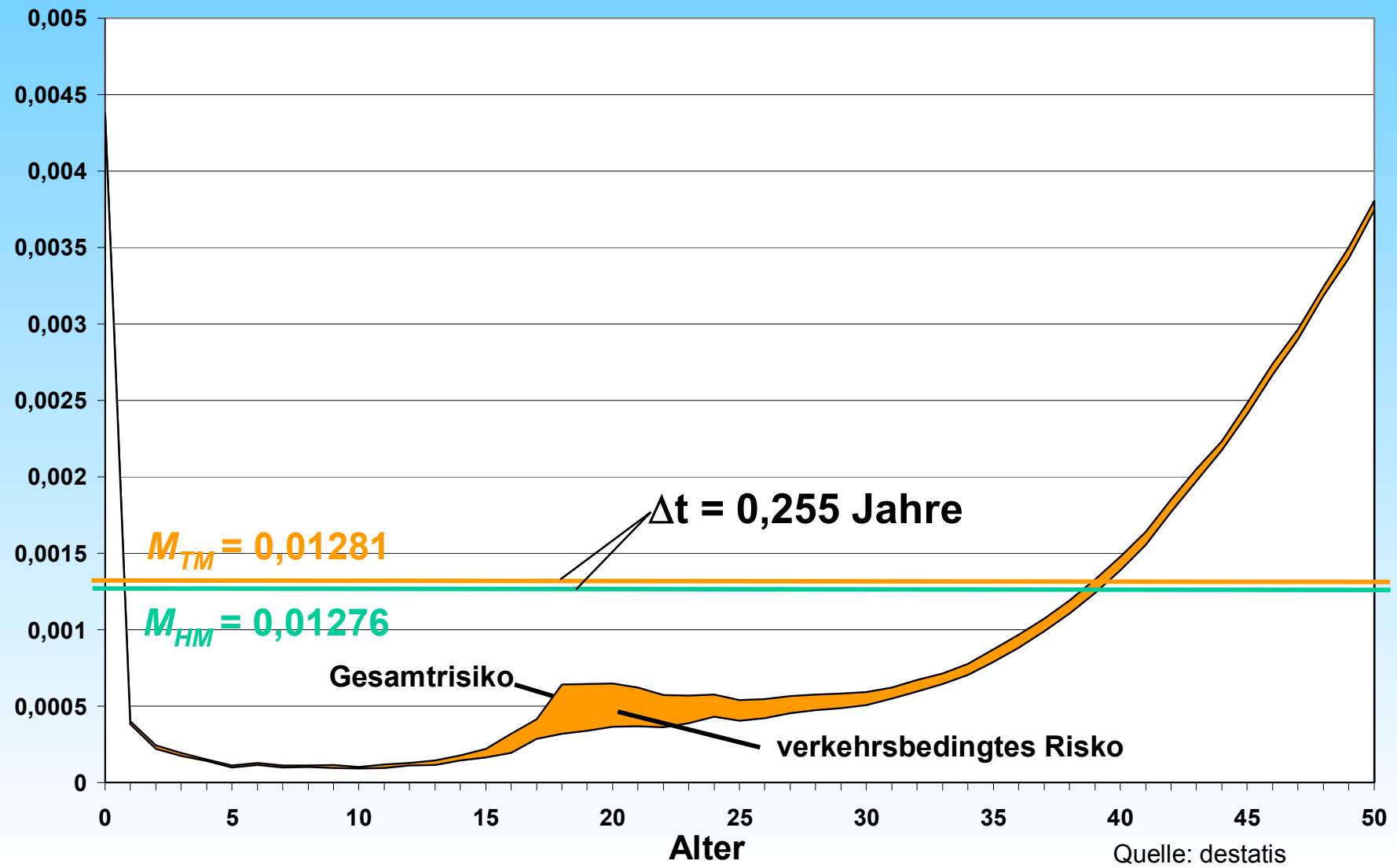
Quelle: destatis

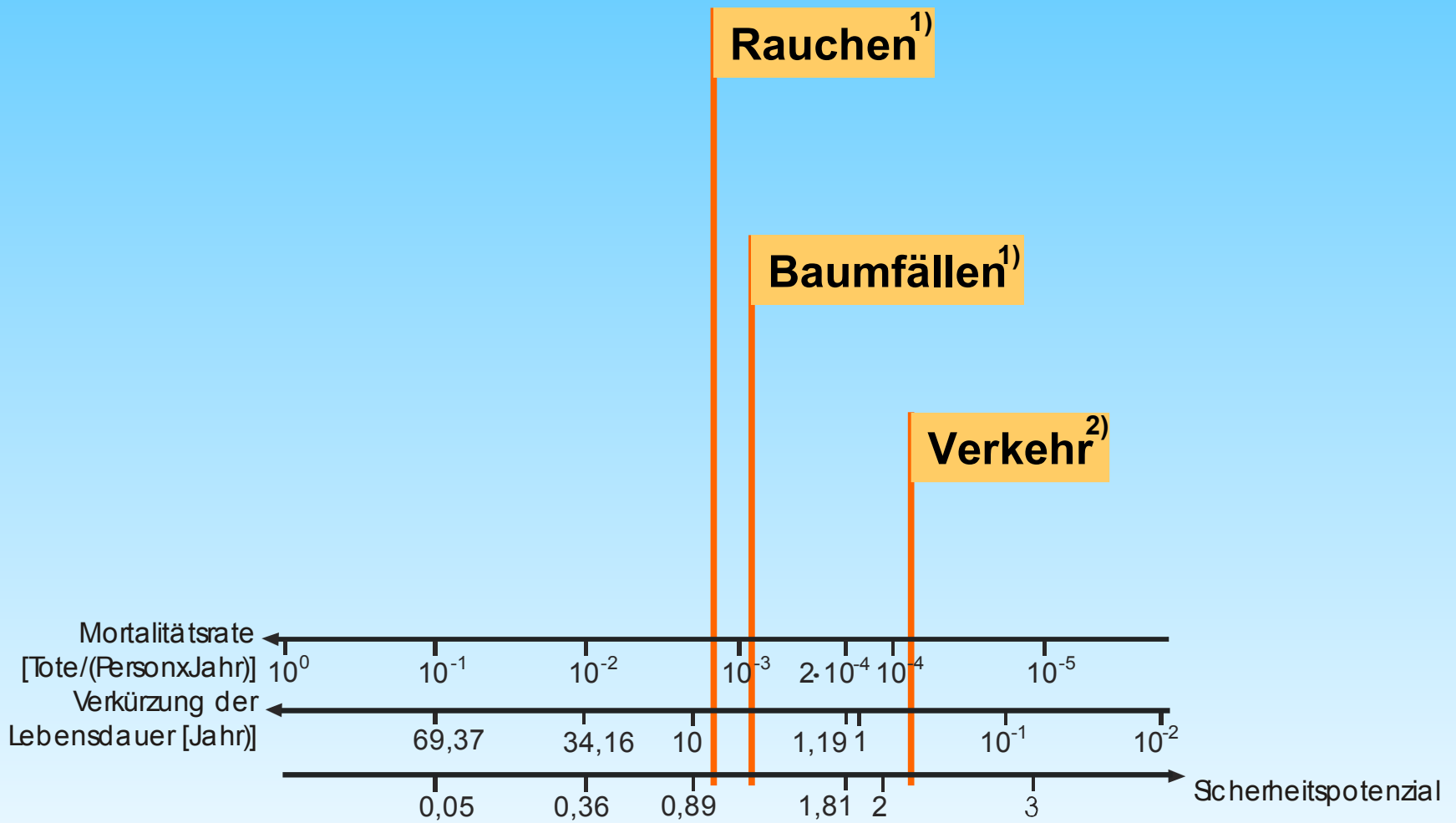
Technische Universität Braunschweig

## Mortalität in Deutschland (2001)

# Mortalität

$$\left[ \frac{\text{Tote}}{\text{Jahr} \cdot \text{Person}} \right]$$





**Quellen**

- 1) Schneider, Zuverlässigkeit ...
- 2) Eigene Ermittlung und WHO

**MTBF** Mean time between failure

**MTTR** Mean time to repair

**A** Verfügbarkeit

$$A = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF}$$

**Q** Unverfügbarkeit

$$Q = 1 - A$$

**pA** Verfügbarkeitspotential

$$pA = -\lg Q = -\lg \frac{MTTR}{MTBF + MTTR}$$

mit  $MTTR \ll MTBF$

$$pA = -\lg Q = -\lg \frac{MTTR}{MTBF}$$

**$t_R$**  Mittlere ideale Reisedauer

$t_R$  f (min Weg, max Weggeschwindigkeit, max Fahrzeuggeschwindigkeit,...)

**$\Delta t_R$**  Mittlere Verlängerung der Reisedauer durch Beschränkungen

$\Delta t_R$  f (Haltezeit, Haltezahl, Stauzahl, Stillstand durch Stau, Störung, Wartezeit, Umsteigezeit,...)

**$A_T$**  Verkehrsverfügbarkeit

$$A_T = \frac{t_R}{t_R + \Delta t_R}$$

**$Q_T$**  Verkehrs-Unverfügbarkeit

$$Q_T = 1 - A_T$$

**pA** Verkehrsverfügbarkeitspotential

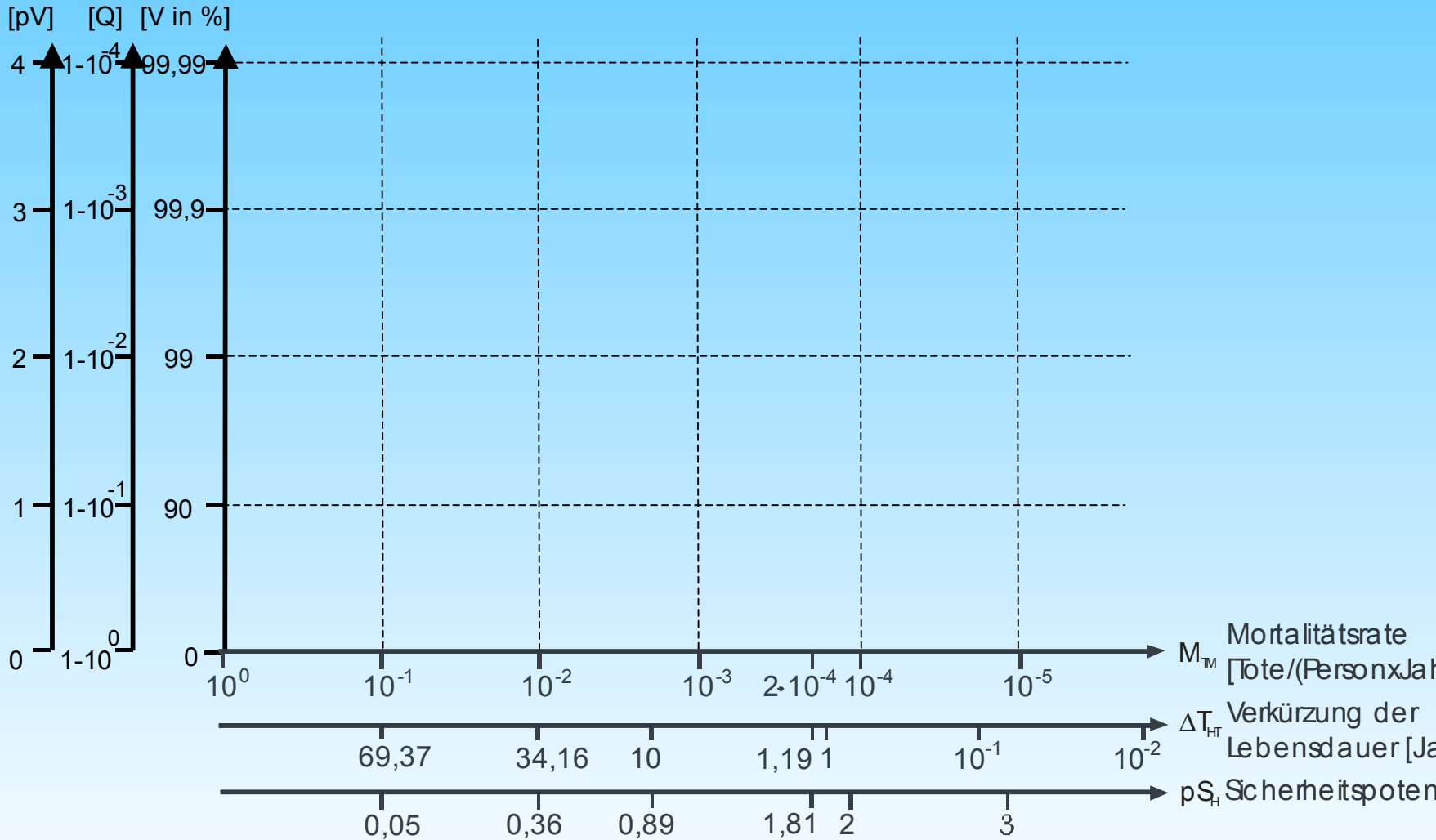
$$pA_T = -\lg Q_T = -\lg \frac{\Delta t_R}{t_R + \Delta t_R}$$

mit  $\Delta t_R \ll t_R$

$$pA_T = -\lg \frac{\Delta t_R}{t_R}$$

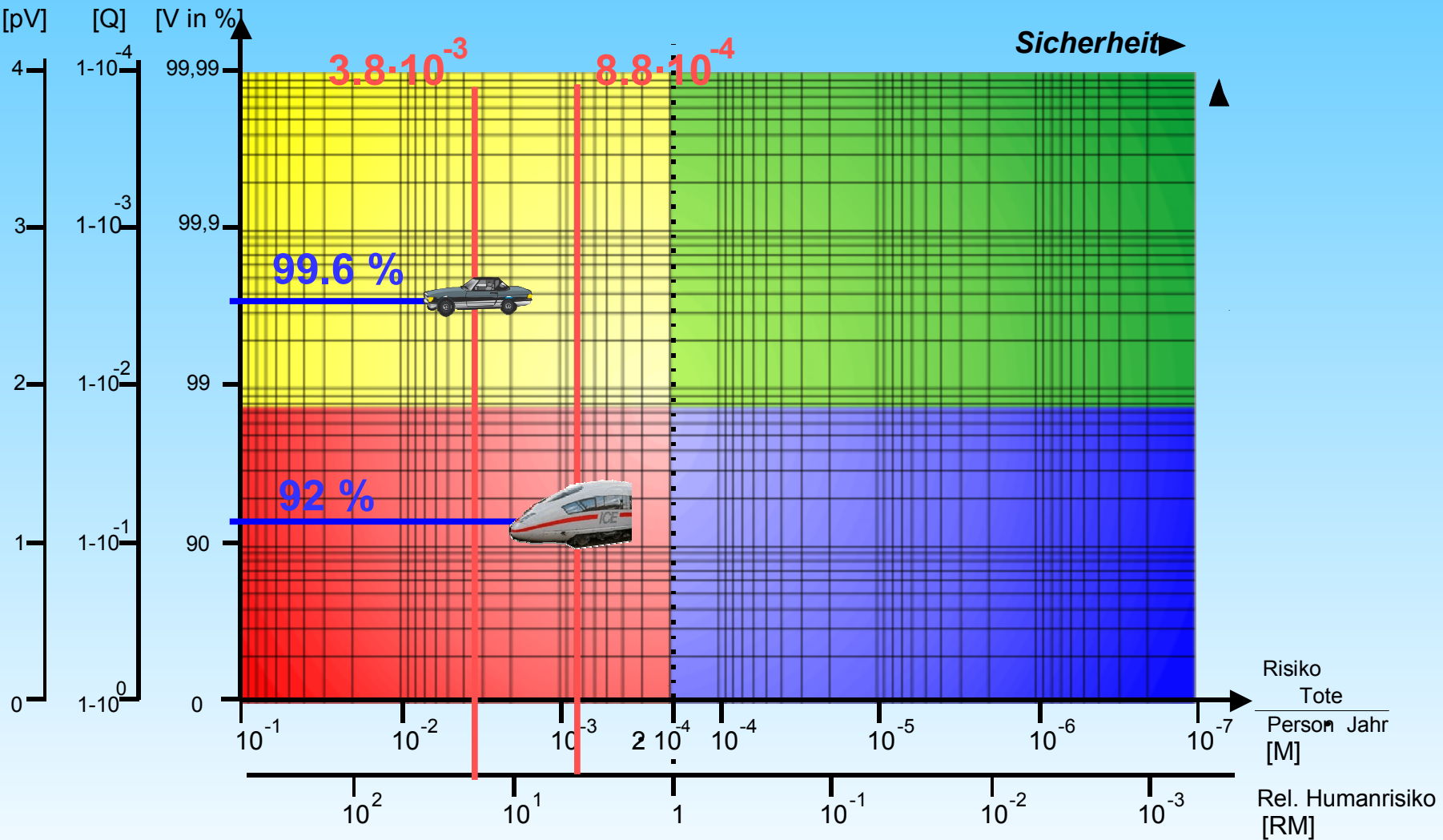
**Definition der Risikomaße**

(Verkehrs)Verfügbarkeit



# Definition der Risikomaße

## Verfügbarkeits-Sicherheitsdiagramm

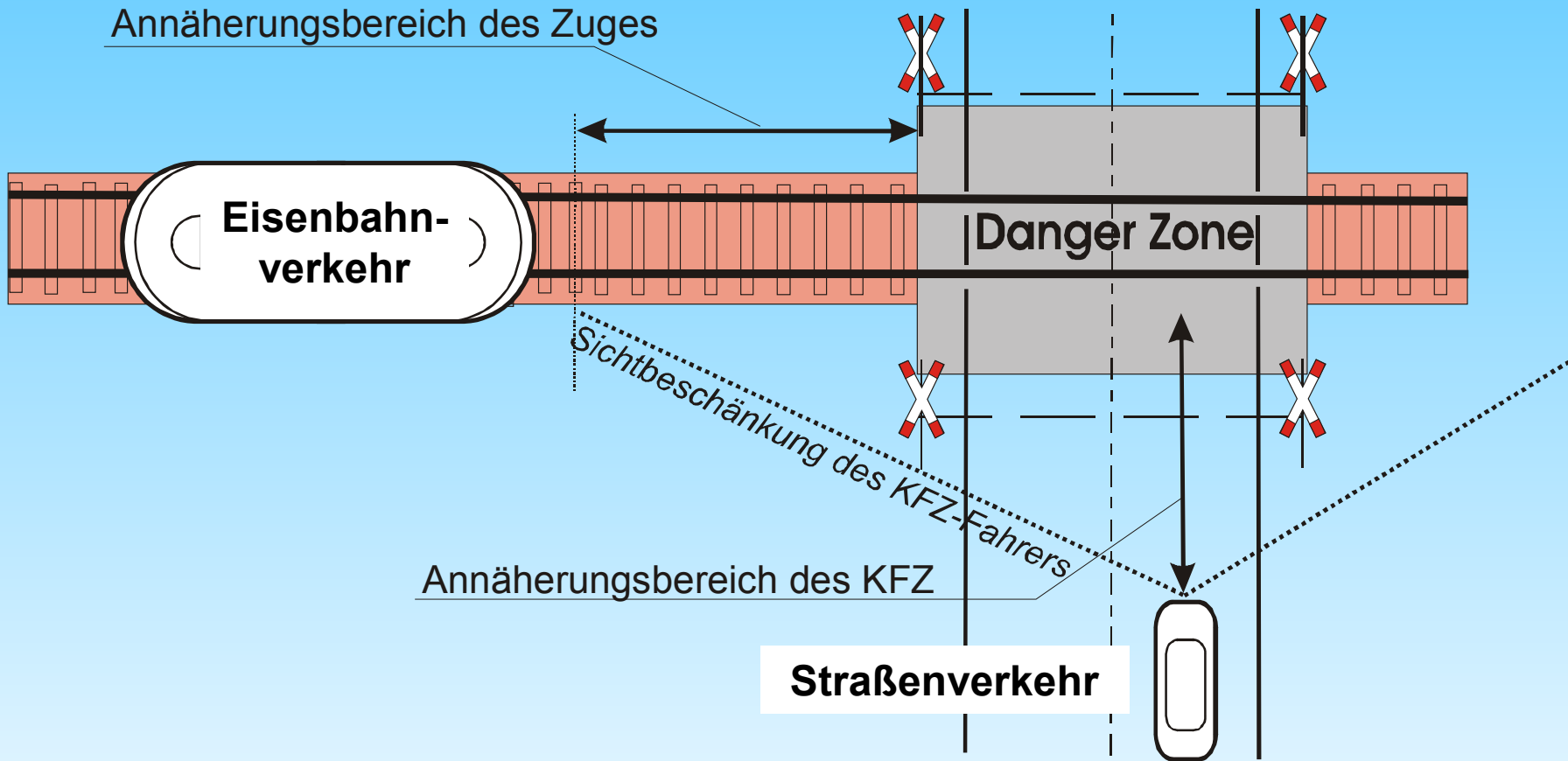


# Quantitative Maße der Verkehrs- Verfügbarkeit und Sicherheit in Deutschland 2003

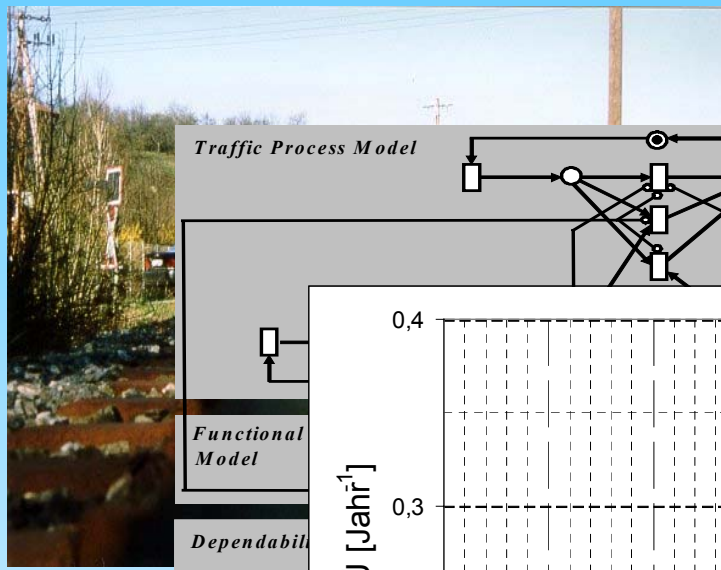
Technische Universität Braunschweig

Institut für Verkehrssicherheit  
und Automatisierungstechnik

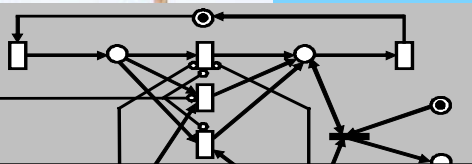
**IVA**



**Wie hoch ist das Risiko des Straßenverkehrs ?**

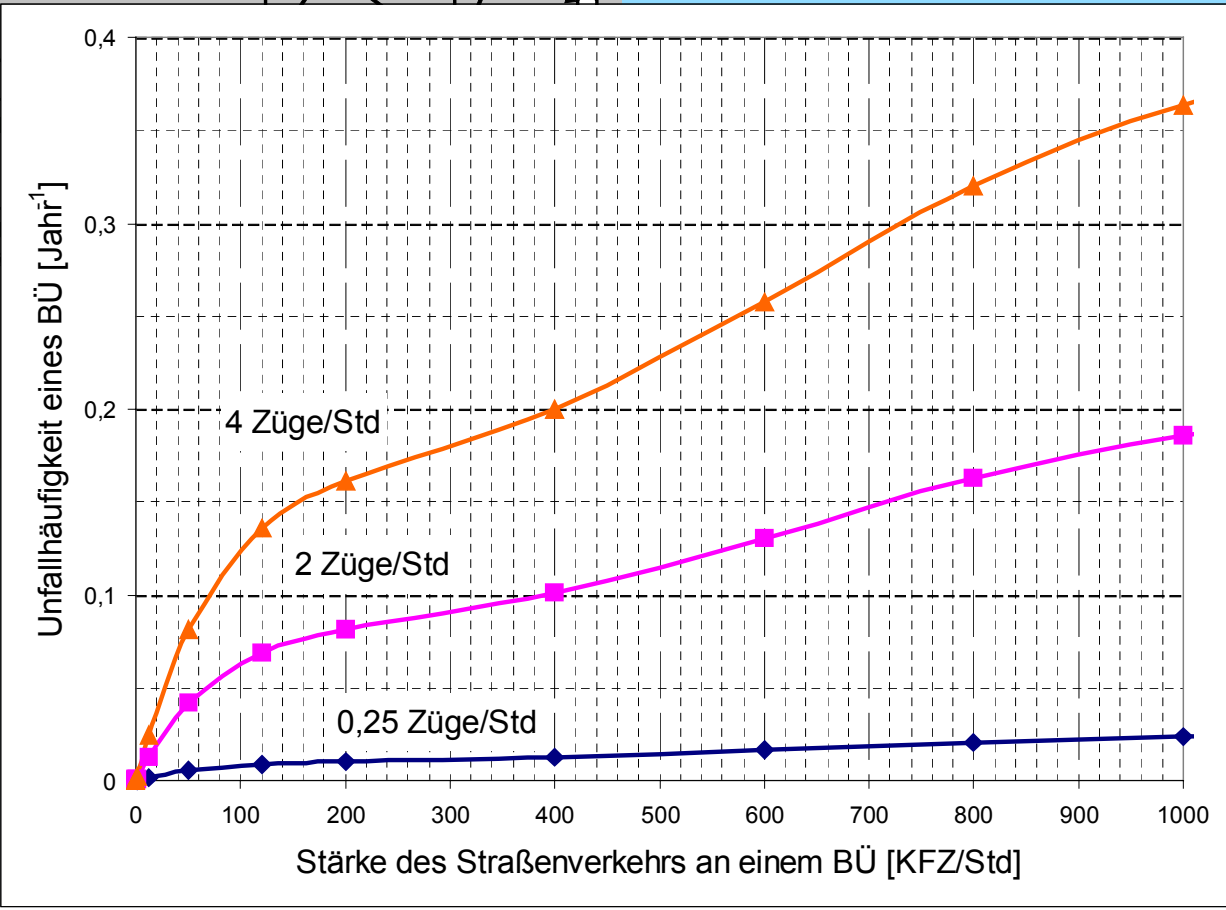


Traffic Process Model



Functional Model

Dependability



# Anwendungsbeispiel Bahnübergang

## Kollektives Risiko ungesicherter BÜ

individuelles Risiko bei *einer* Nutzung eines Bahnübergangs:

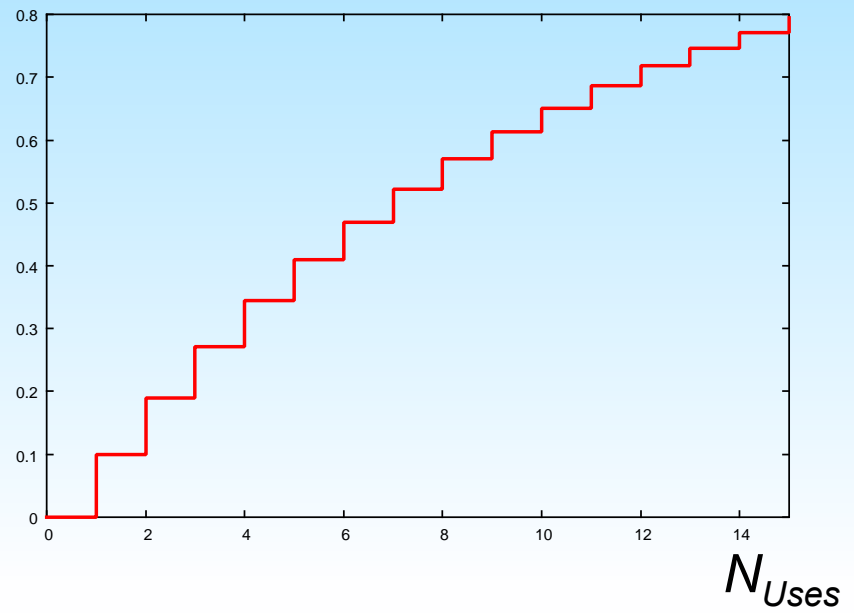
$$R_{LXUse} = \frac{M_{Collective}}{N_{Users}} = \frac{r_{Accident} \cdot C_F}{N_{Users}}$$

$M_{Collective}$   
 $N_{Users}$   
 $N_{Uses}$   
 $r_{Accident}$   
 $C_F$

kollektives Risiko [Tote/(Pers\*Jahr)]  
 Anzahl der BÜ-Nutzer [Pers/Jahr]  
 Anzahl der BÜ-Nutzungen [Jahr]  
 Unfallrate [Jahr<sup>-1</sup>]  
 Fatalitätsfaktor [Tote/Unfall]

und bei  $N_{Uses}$  Nutzungen :

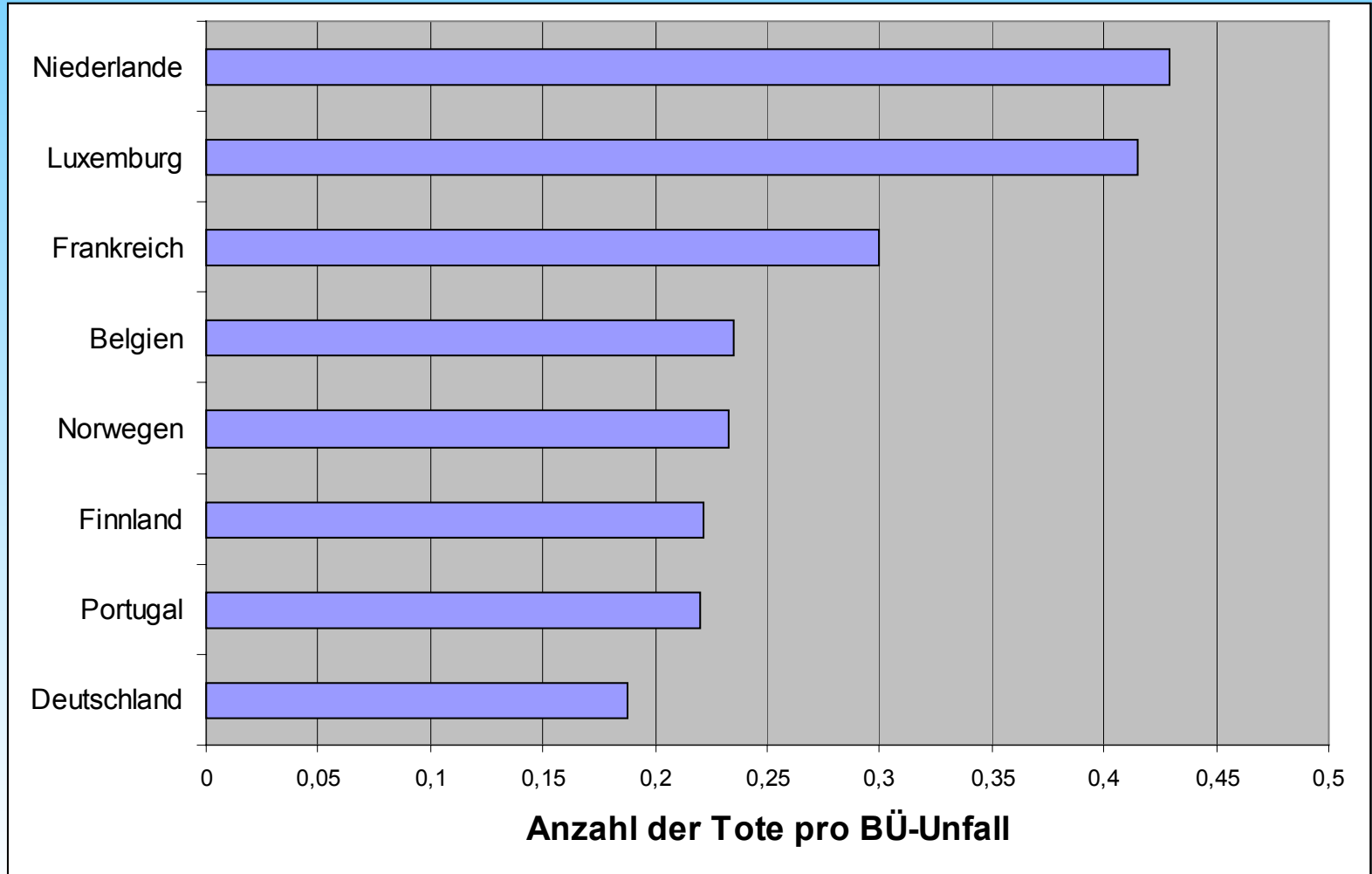
$$R_{LXIndividuum} = 1 - (1 - R_{LXUse})^{N_{Uses}}$$

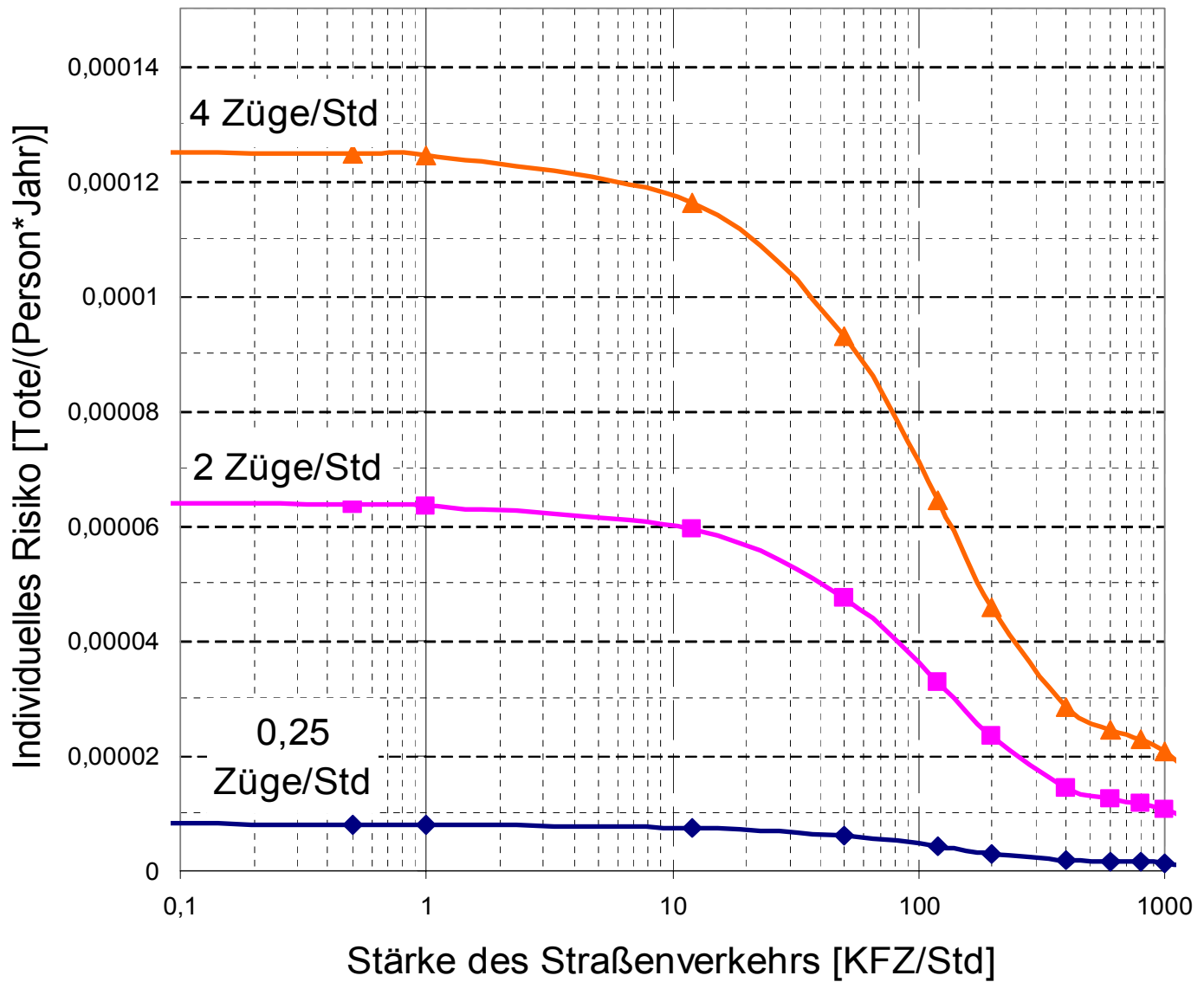


# Mortalität pro System



# Mortalität pro Unfall





## Anwendungsbeispiel Bahnübergang

Individuelles Risiko ungesicherter BÜ

Wahrscheinlichkeit eines Todesfalles des Individuums innerhalb von  $t$  Zeiteinheiten (Jahren):

$$P_{LX\text{Individuum}}(T < t) = 1 - (1 - R_{LXUse})^{N_{Uses}t} = 1 - e^{(N_{Uses} \ln(1 - R_{LXUse}))t} = 1 - e^{-\lambda t}$$

Mortalität  $M_{LX}$ , eines Individuums durch Benutzung des Bahnübergangs:  
( $N_{Uses} = 500 \text{ Jahr}^{-1}$ )

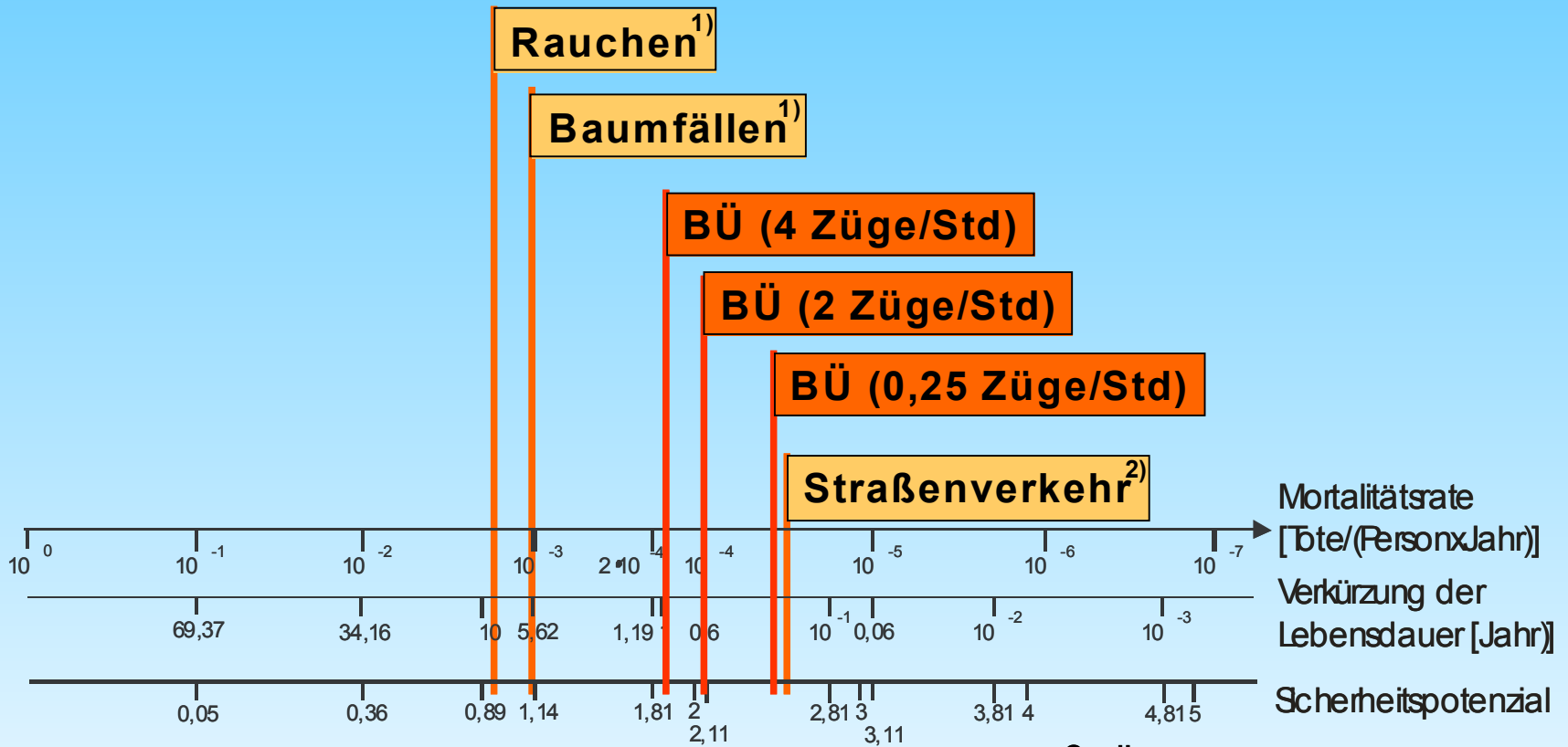
$$\lambda = M_{LX} = -N_{Uses} \ln(1 - R_{LXUse}) = -500 \cdot \ln(1 - 2.5 \cdot 10^{-7}) = 0.000125/\text{Jahr}$$

und die Verkürzung menschlicher Lebensdauer:

$$T_{HT} = T_H - \Delta T_{HT} = T_H - \frac{1}{\frac{1}{T_H} + M_{LX}} = \frac{T_H^2 \cdot M_{LX}}{1 + T_H \cdot M_{LX}} = \frac{78.34^2 \cdot 0.000125}{1 + 78.34 \cdot 0.000125} = 0.7597 \text{ Jahr}$$

Sicherheitspotential:

$$pS_H = -\lg \frac{M_{TM}}{M_{HM}} = -\lg \frac{\Delta T_{HT}}{T_H} = -\lg \frac{0.7597}{78.34} = 2.013$$



**Quellen**

- 1) Schneider, Zuverlässigkeit
- 2) Eigene Ermittlung und WHO

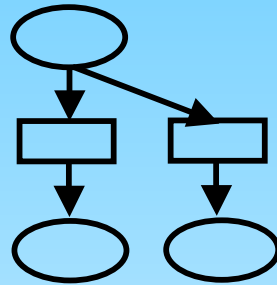
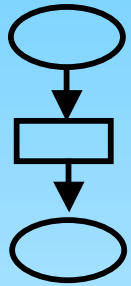
- Ansatz unterstützt eine intuitive Bildung des Risikobewusstseins eines Menschen
- Ermöglicht die Erfassung einer gesellschaftlichen Risikoakzeptanz
- Grundlage für eine ganzheitliche Vergleichbarkeit der Verkehrssysteme sogar aus der Sicht der Verlässlichkeit
- Anwendung bei Anforderungsspezifikation, Design und Zulassung der technischen Systeme
- Unterstützung der Fahrgastentscheidung

## Ausblick

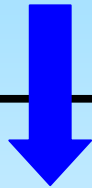
- Integration des Faktors menschlicher Selbstbestimmung
- Integration der „gefühlten“ Sicherheit

abstrakt

konkret

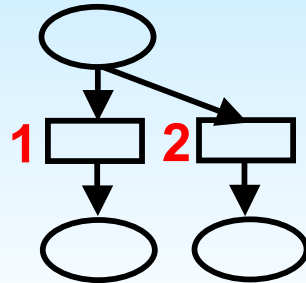
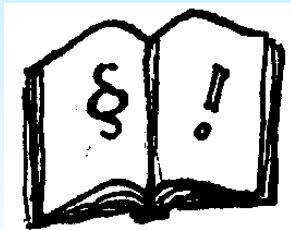


Prozess

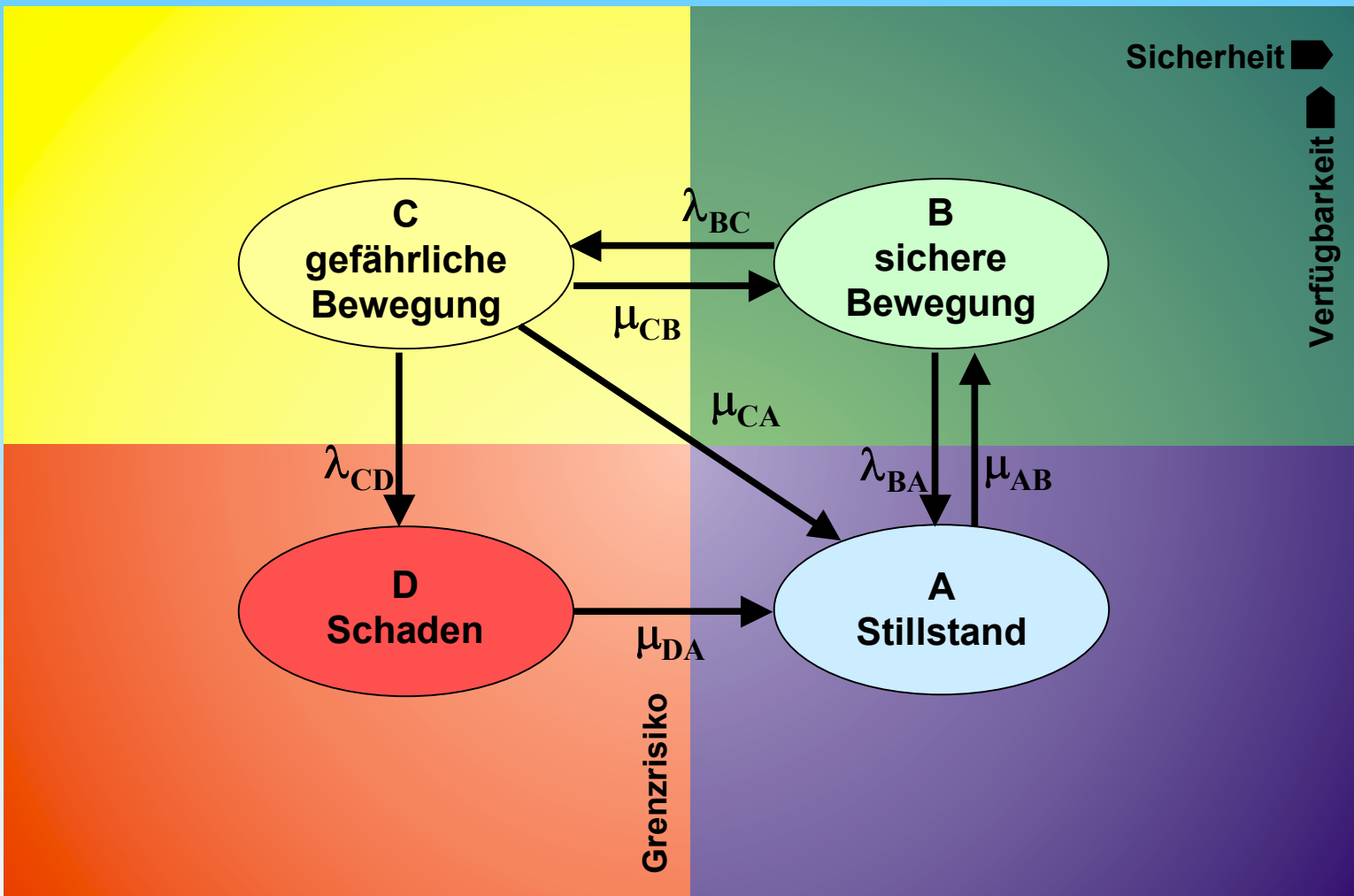


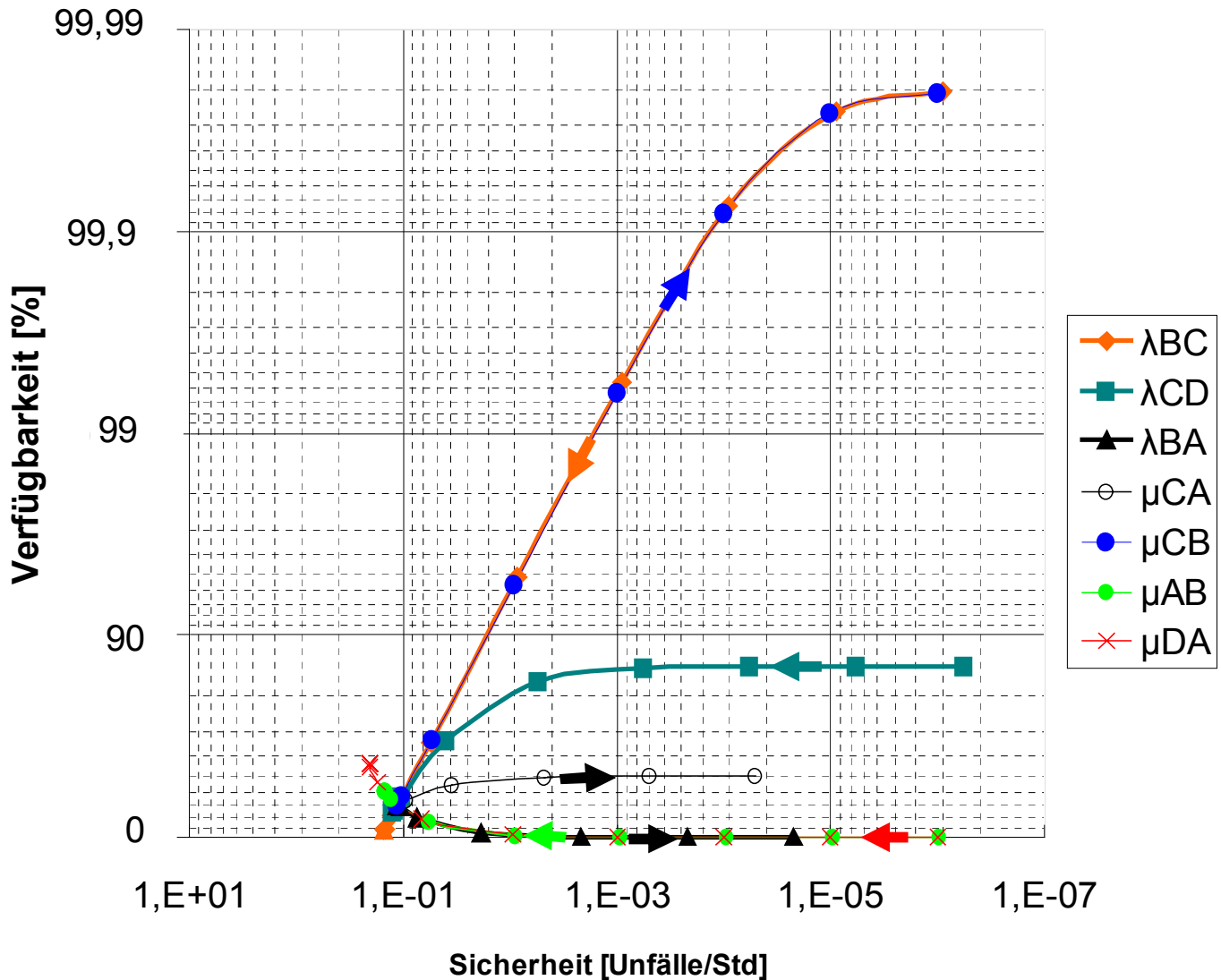
- Regeln, Reihenfolgen, ...

- Gesetze, Programmcode, ...



Steuerung





# Einfluss der Zustandsübergangsraten auf die Sicherheit und Verfügbarkeit