

# **Kriterien für die Beurteilung von Gefährdungen durch technische Anlagen**

---

Ulrich Hauptmanns  
Marcus Marx



## Zielsetzung des Vorhabens

---

- Ermittlung von
  - Energieinhalten
  - schädlichen Auswirkungen auf den Menschen
  - anderen Charakteristika

technischer Anlagen mit einfachen Methoden, um einen Vergleich des Gefährdungspotentials zu ermöglichen.



# Inhaltsübersicht (1)

---

1. Einleitung
2. Probitbeziehungen
3. Berechnung der Auswirkung von  
Energiefreisetzungen
4. Ermittlung von Energieinhalten



## Inhaltsübersicht (2)

---

5. Fallstudien
6. Risikogrenzwerte
7. Ermittlung des ortsbezogenen Risikos beim Versagen des Gasspeicherbehälters einer Biogasanlage
8. Anwendung des Räuber-Beute Modells auf Aufzüge



## Inhaltsübersicht (3)

---

9. Modellierung von Funktionsprüfungs- und Instandsetzungsvorgängen

10. Zusammenfassung

Schrifttum

Anhang A: Grenzwerte aus dem europäischen Ausland und Schwellenwerte für schadensverursachende Belastungen

Anhang B: Unfallberichte



## Vorgehensweise

---

- Ermittlung des Energieinhaltes, Umrechnung in das TNT Äquivalent (4650 kJ/kg), und
- des daraus folgenden abstandsabhängigen Druckverlaufs
- Problem: Belastungen durch Wärmestrahlung können dadurch nicht erfasst werden

## Lösung mit Hilfe des Probit Konzepts

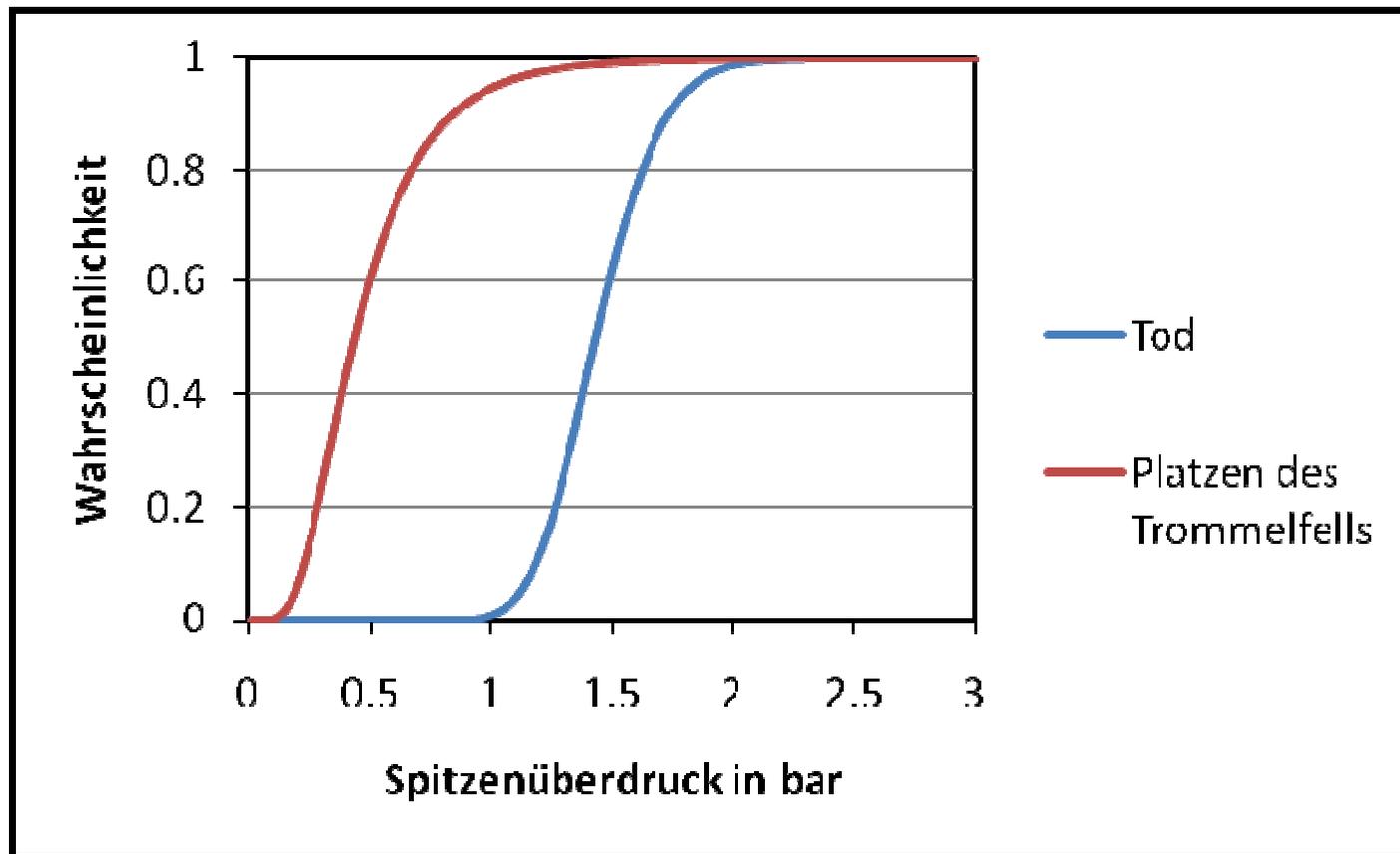
---

$$P_{\text{Schaden}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \Phi(Y-5)$$

$$Y = -15,6 + 1,93 \cdot \ln p^0 \quad \text{Platzen des Trommelfells}$$

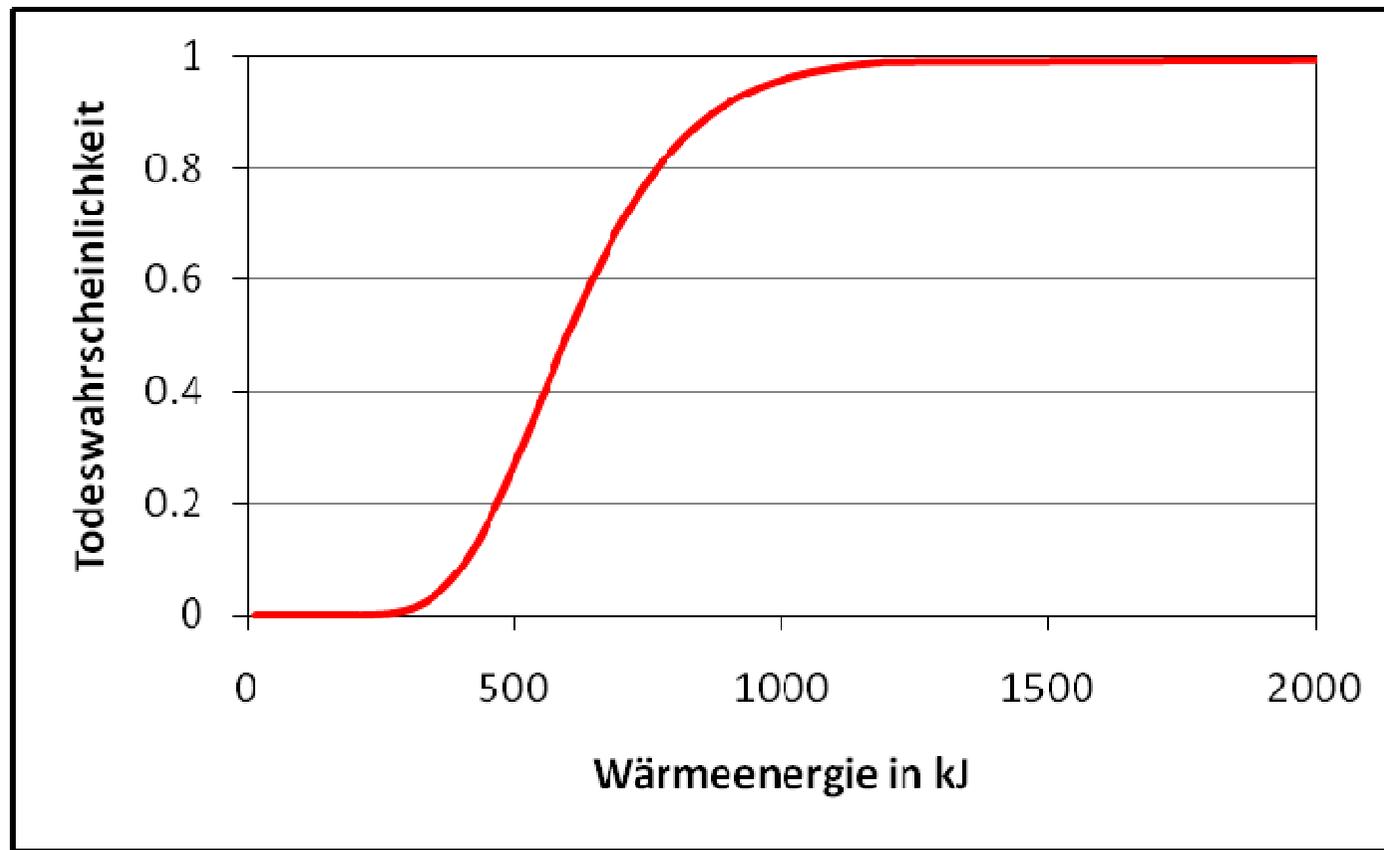
$$Y = -77,1 + 6,91 \cdot \ln p^0 \quad \text{Tod}$$

# Probit Konzept - Schaden durch Überdruck



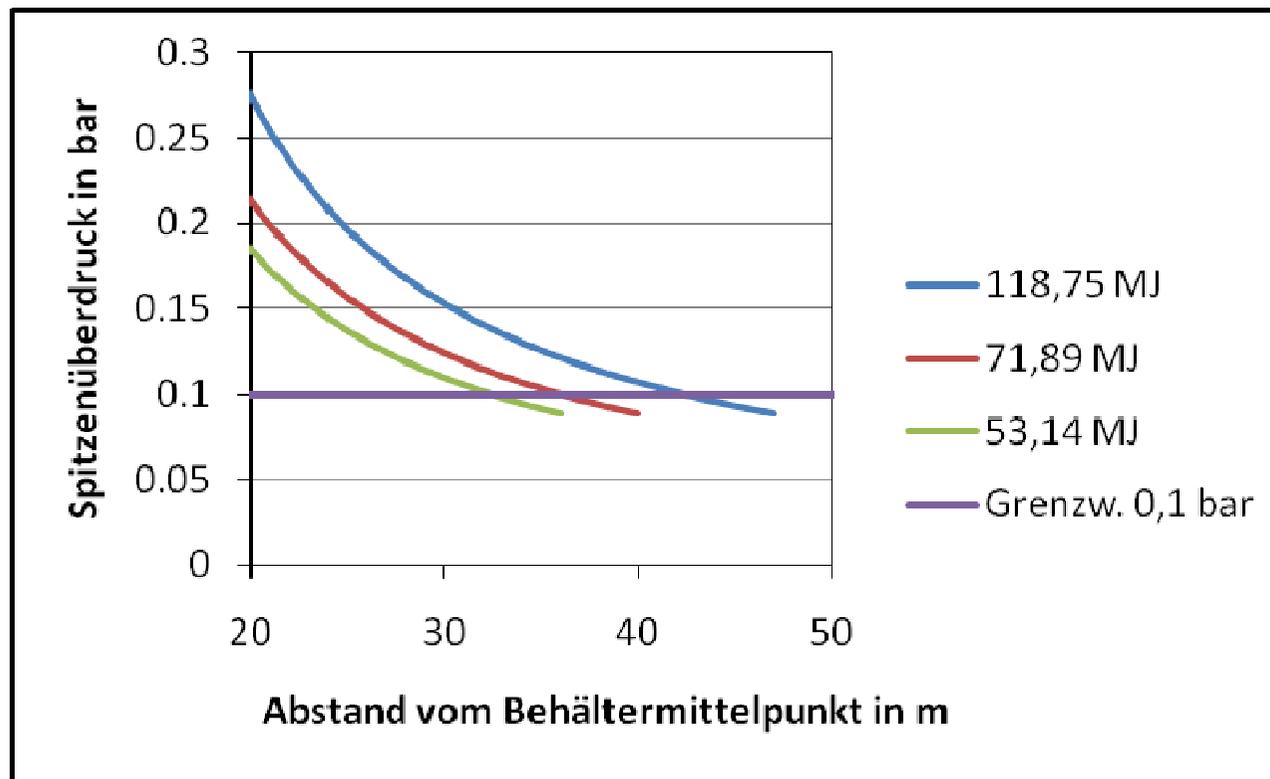
# Probit Konzept - Schaden durch Wärmeenergie

---

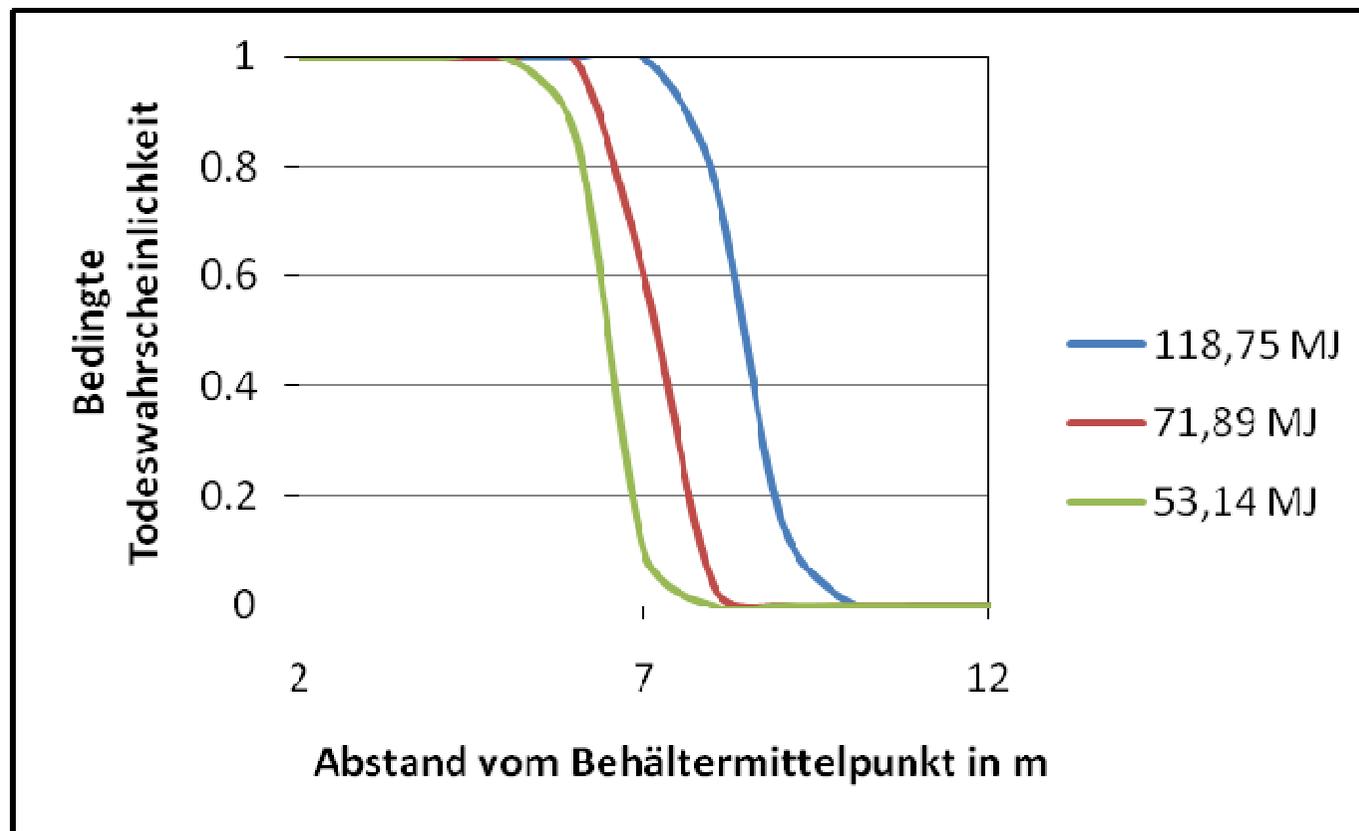


## Behandelt wurden schädliche Einwirkungen auf den Menschen aus verschiedenen Arten der Energiefreisetzung

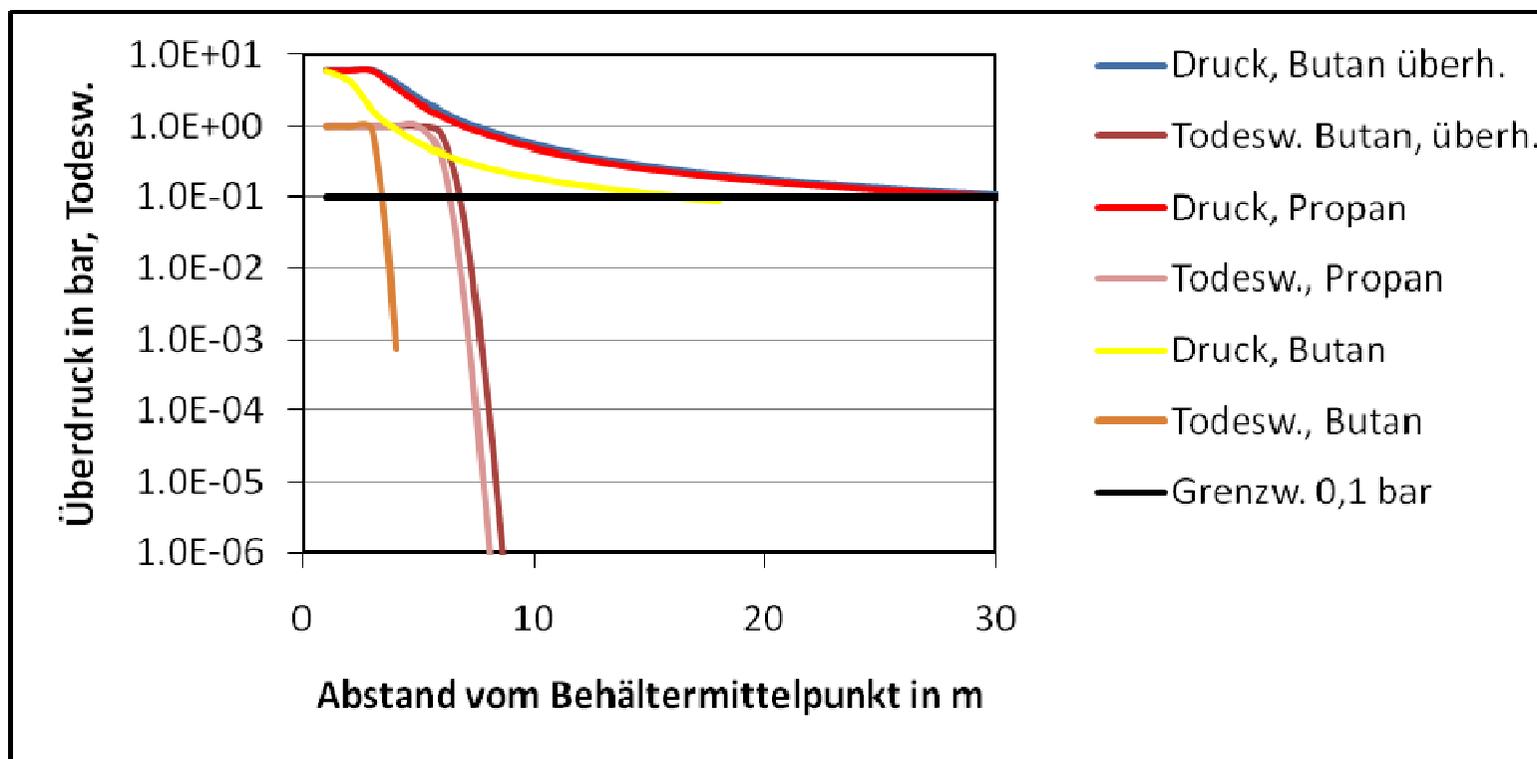
Freisetzung gespeicherter Druckenergie (komprimiertes Gas - physikalische Energie)



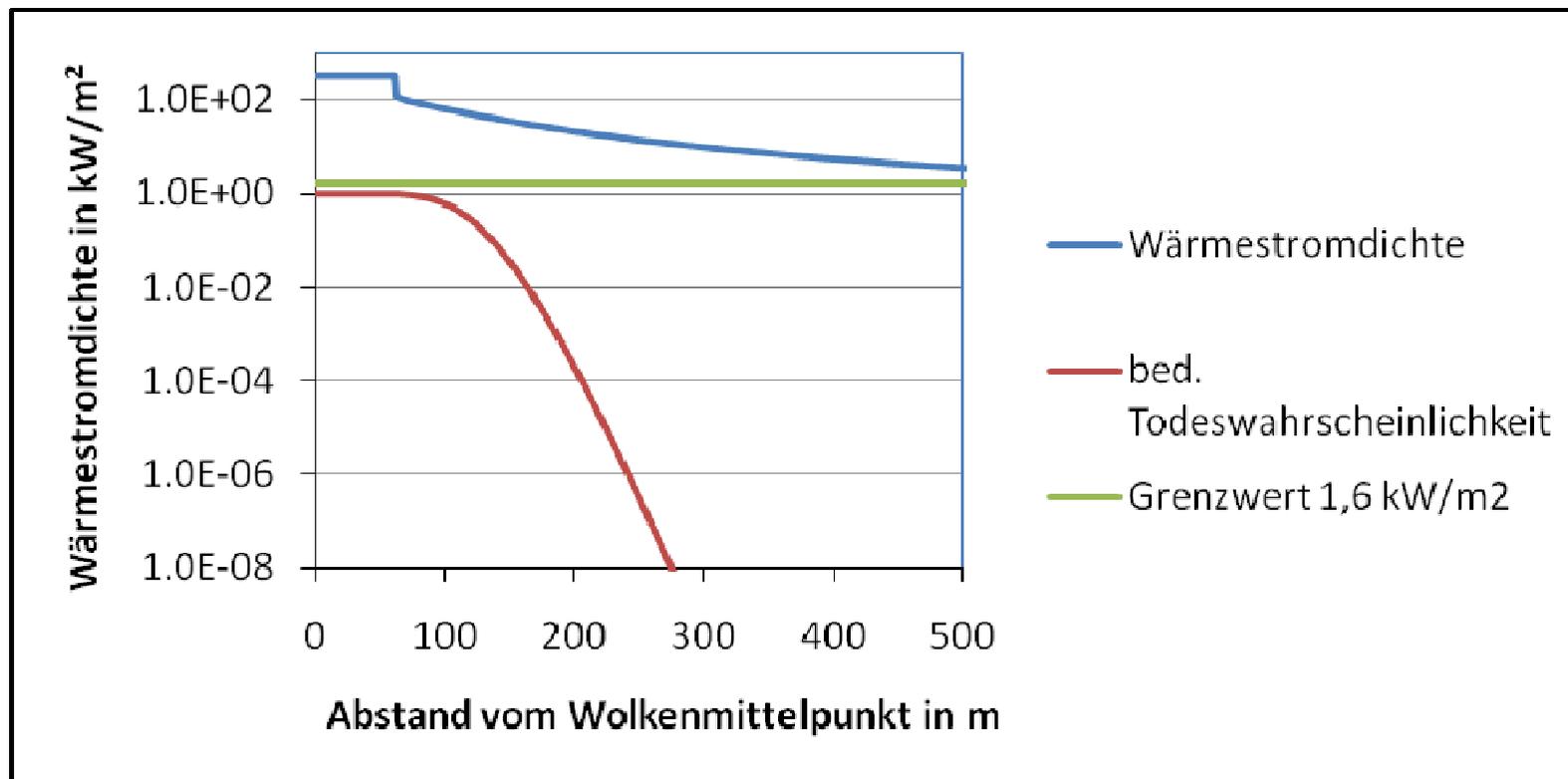
## Örtlicher Verlauf der Todeswahrscheinlichkeit für die vorangehenden Druckverläufe – ohne Trümmerwurf und mögliche Gebäudeschäden



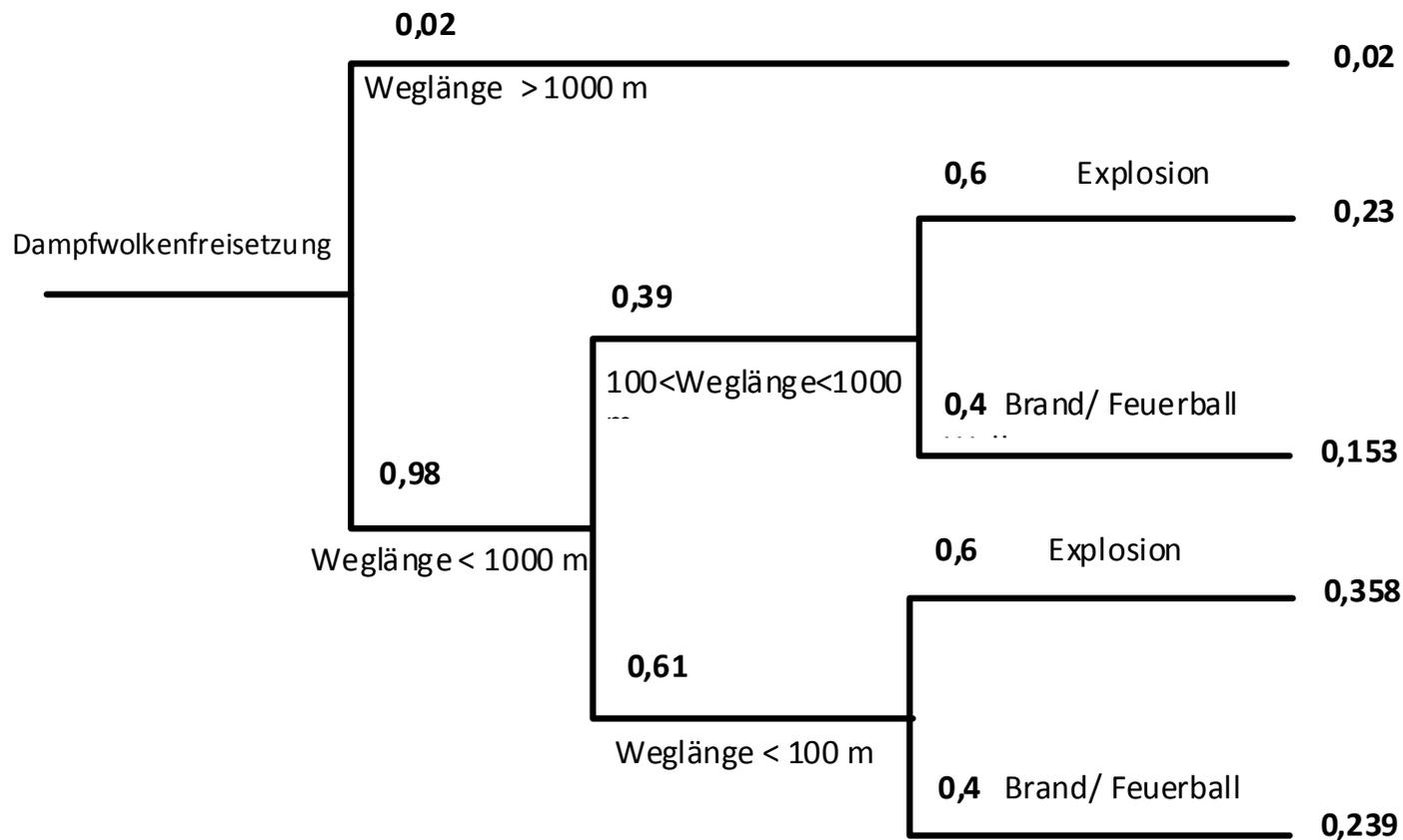
# Ortsabhängiger Druck- und Todeswahrscheinlichkeitsverlauf nach dem Bersten eines 3 m<sup>3</sup> Behälters (nur physikalische Energie des druckverflüssigten Gases)



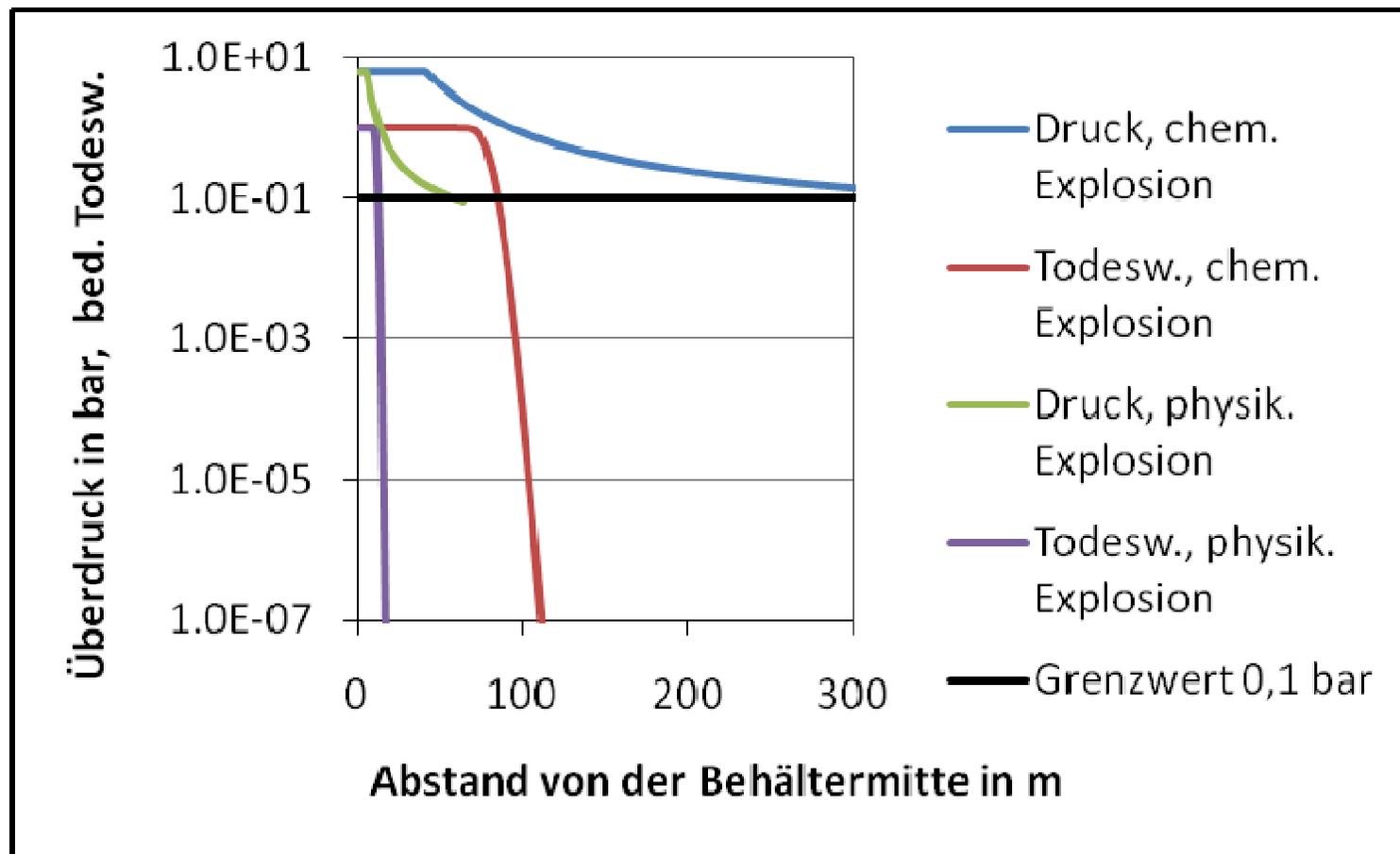
# Folgen eines Feuerballs aus der Freisetzung von 10 t Propan (chemische Energie)



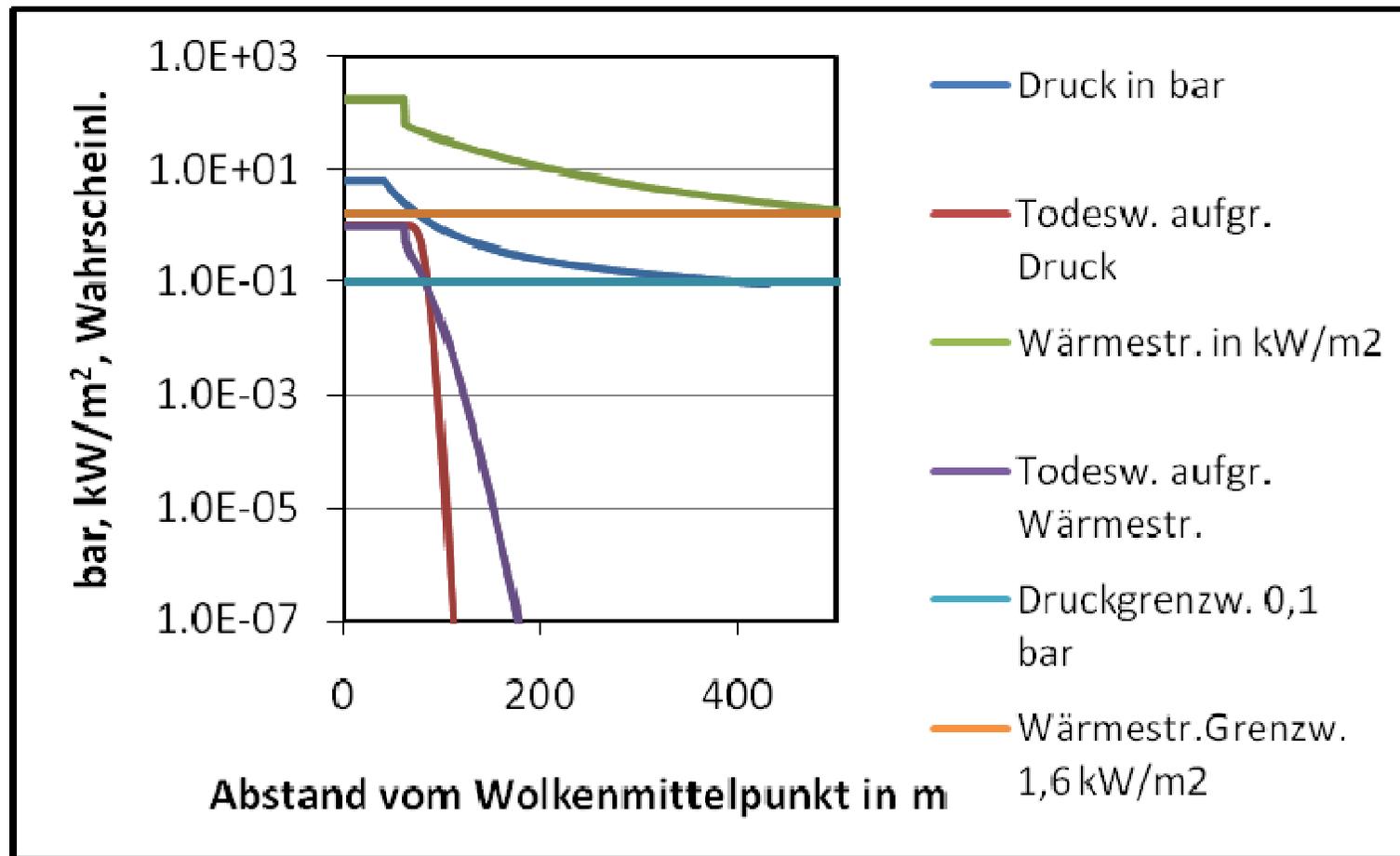
# Ereignisablaufdiagramm für Freisetzung einer Dampfwolke



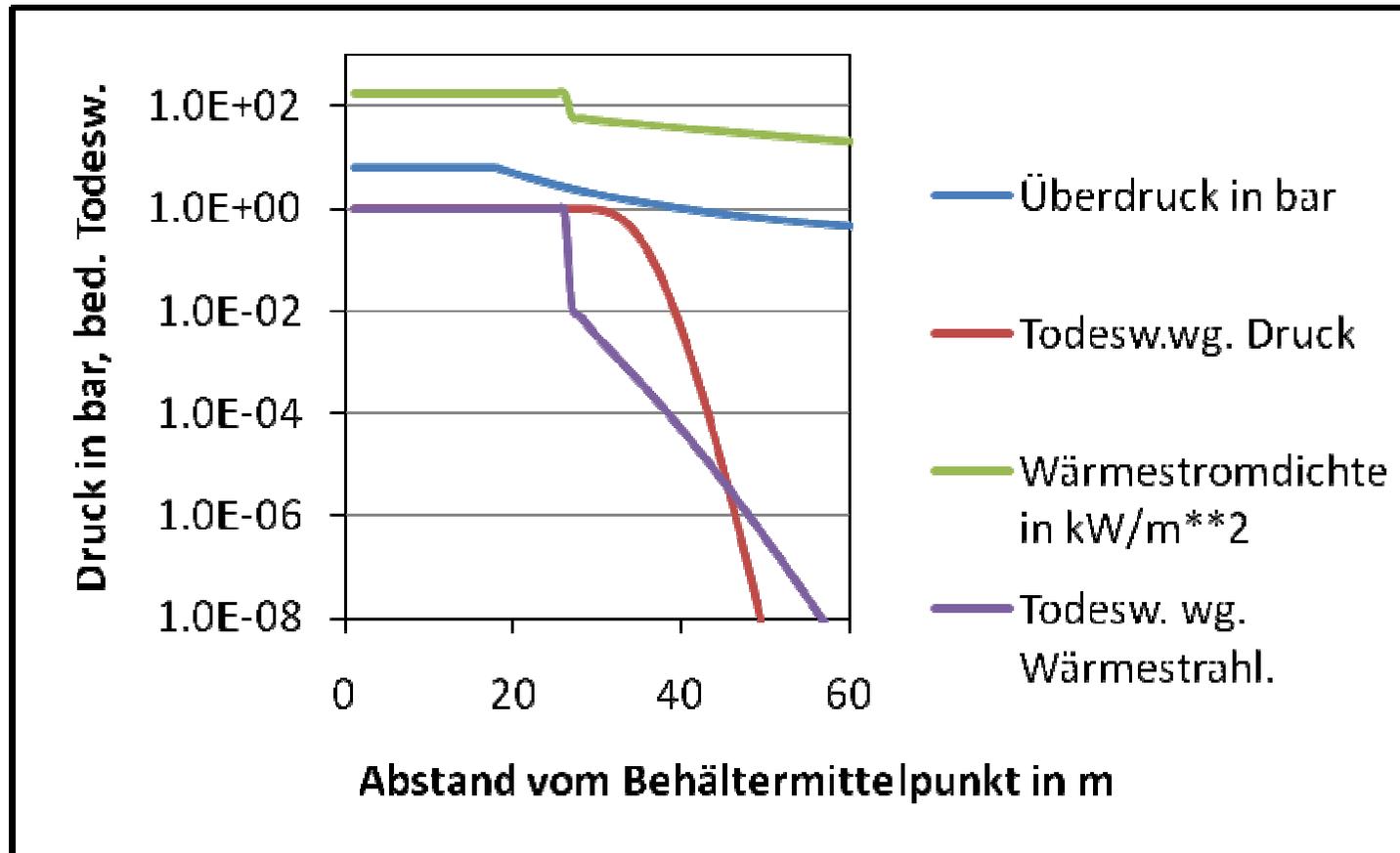
# Auswirkungen physikalischer und chemischer Explosion bei der Freisetzung von 25m<sup>3</sup> druckverflüssigtem Propan entsprechend 64,5 kg TNT- nur Druckwelle



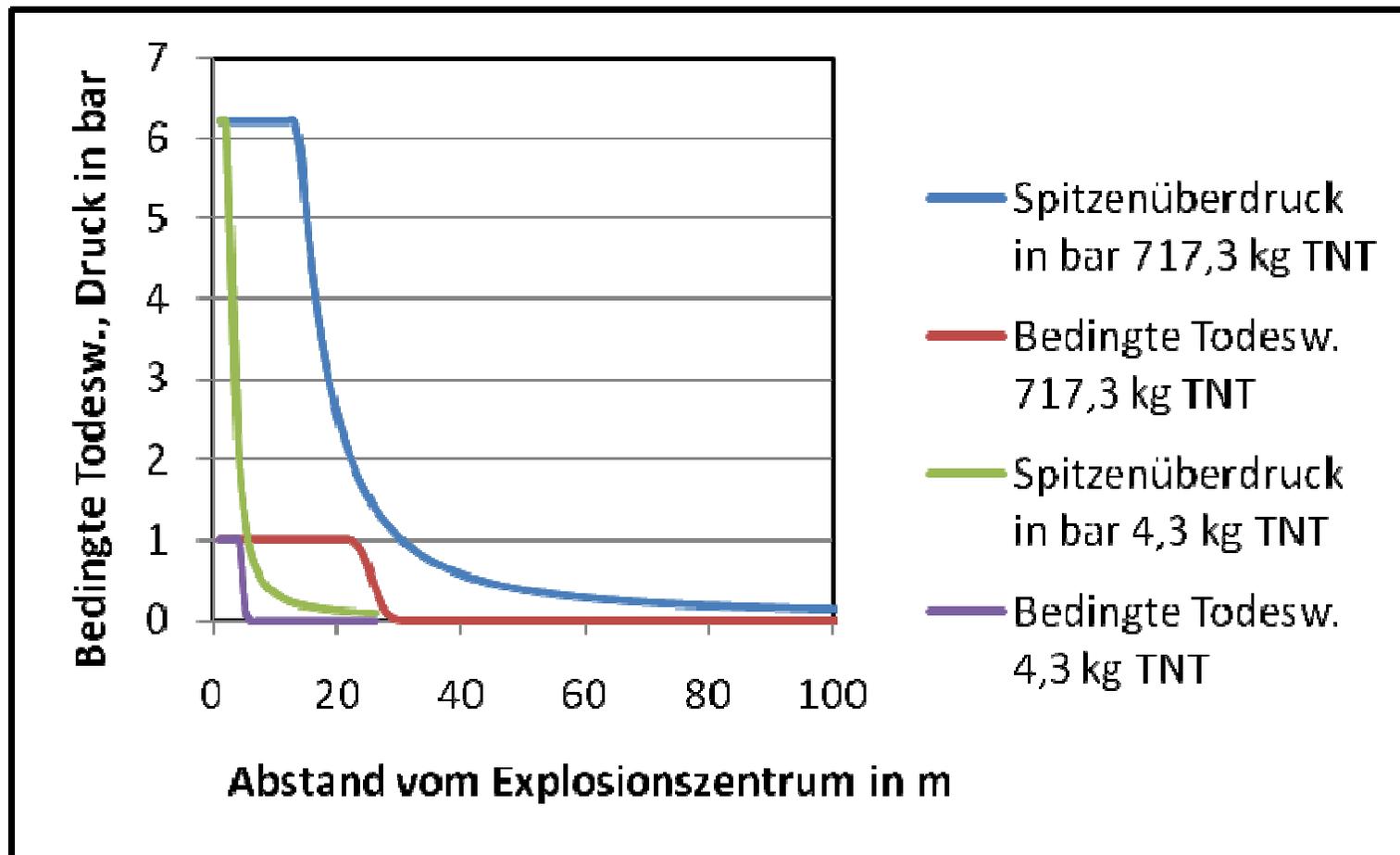
# Auswirkungen von Explosion und Feuerball bei der Freisetzung von 25m<sup>3</sup> druckverflüssigtem Propan entsprechend 64,5 kg TNT



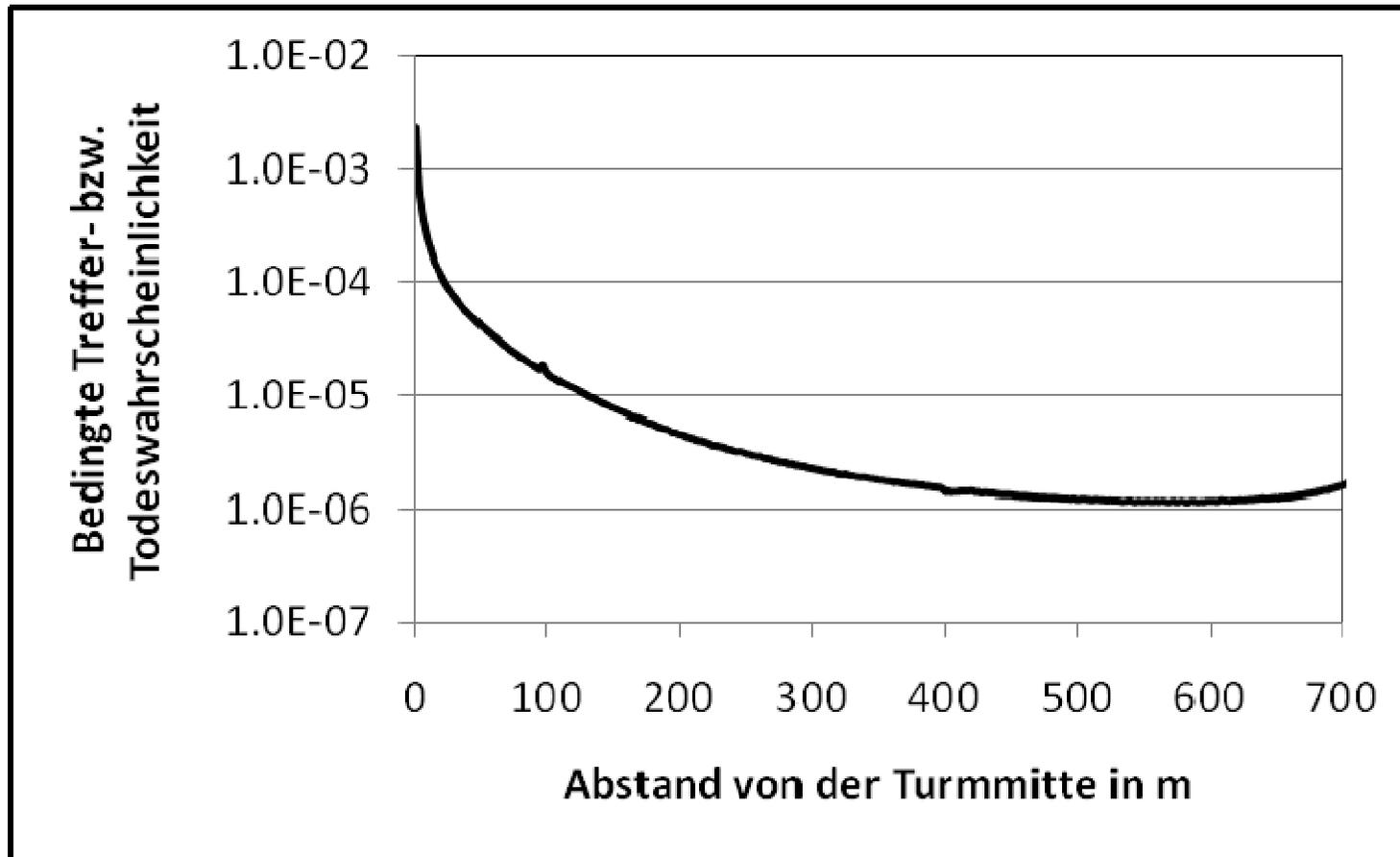
Explosion oder Gaswolkenfeuer bei Freisetzung von 756 kg Methan aus einer Biogasanlage/Behältervolumen 1500 m<sup>3</sup> – Gaswolkenfeuer wahrscheinlicher wegen Drucklosigkeit



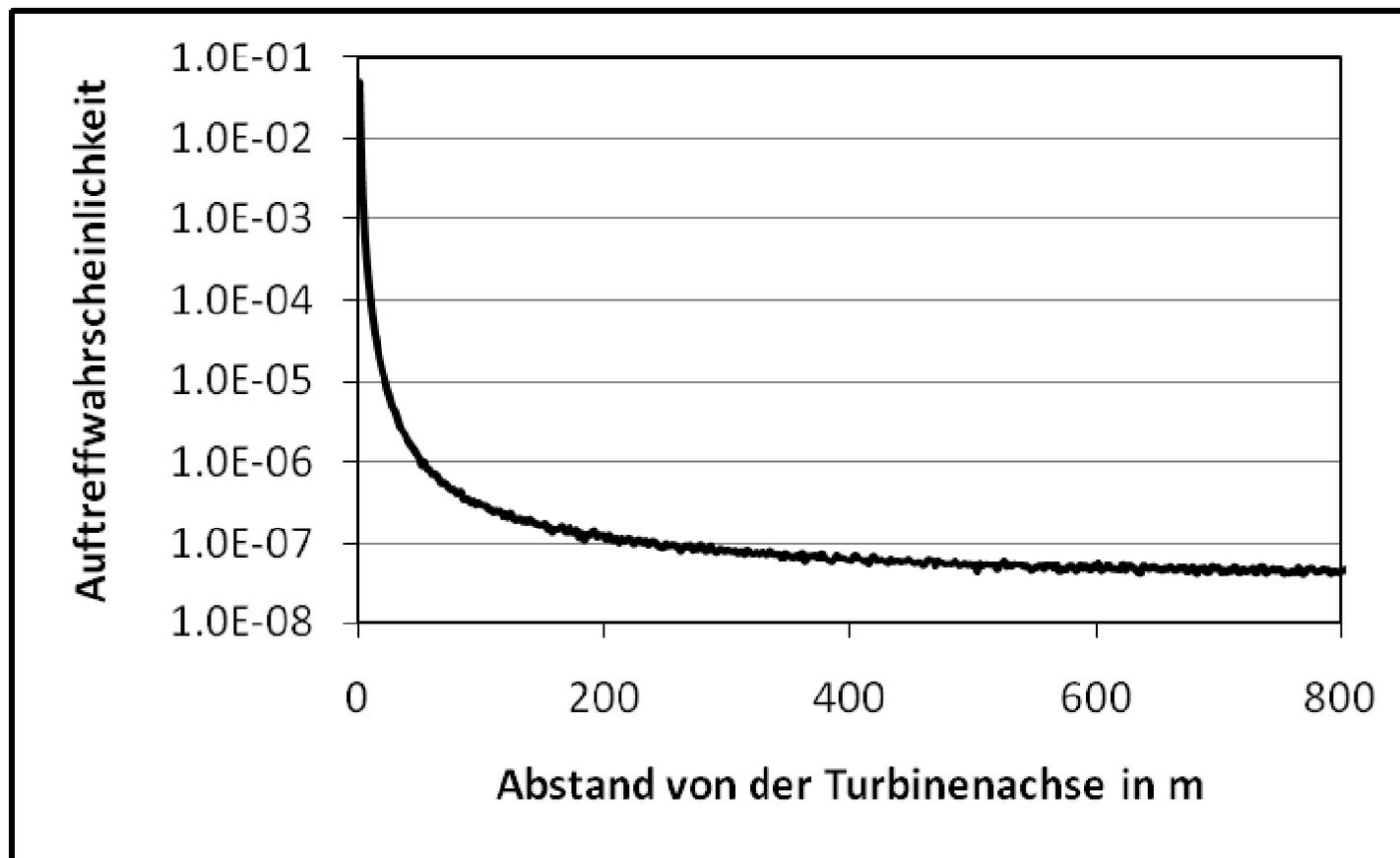
# Explosion von Nitroglycerin



# Abgerissener Rotorflügel (kin. Energie 125,4 MJ; pot. Energie 71,8 MJ)



# Weggesprengter Turbinenläufer



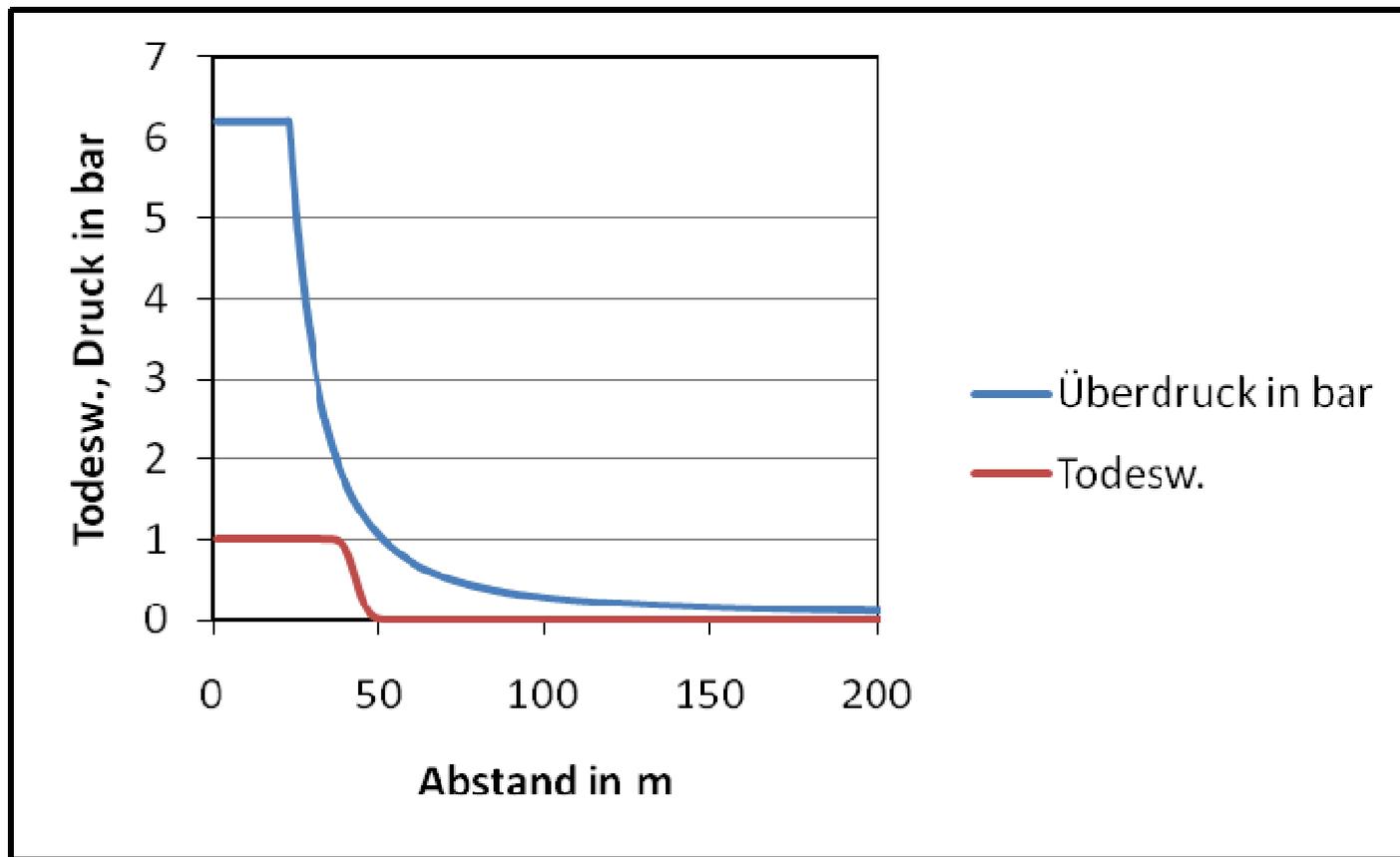


## Fallstudien

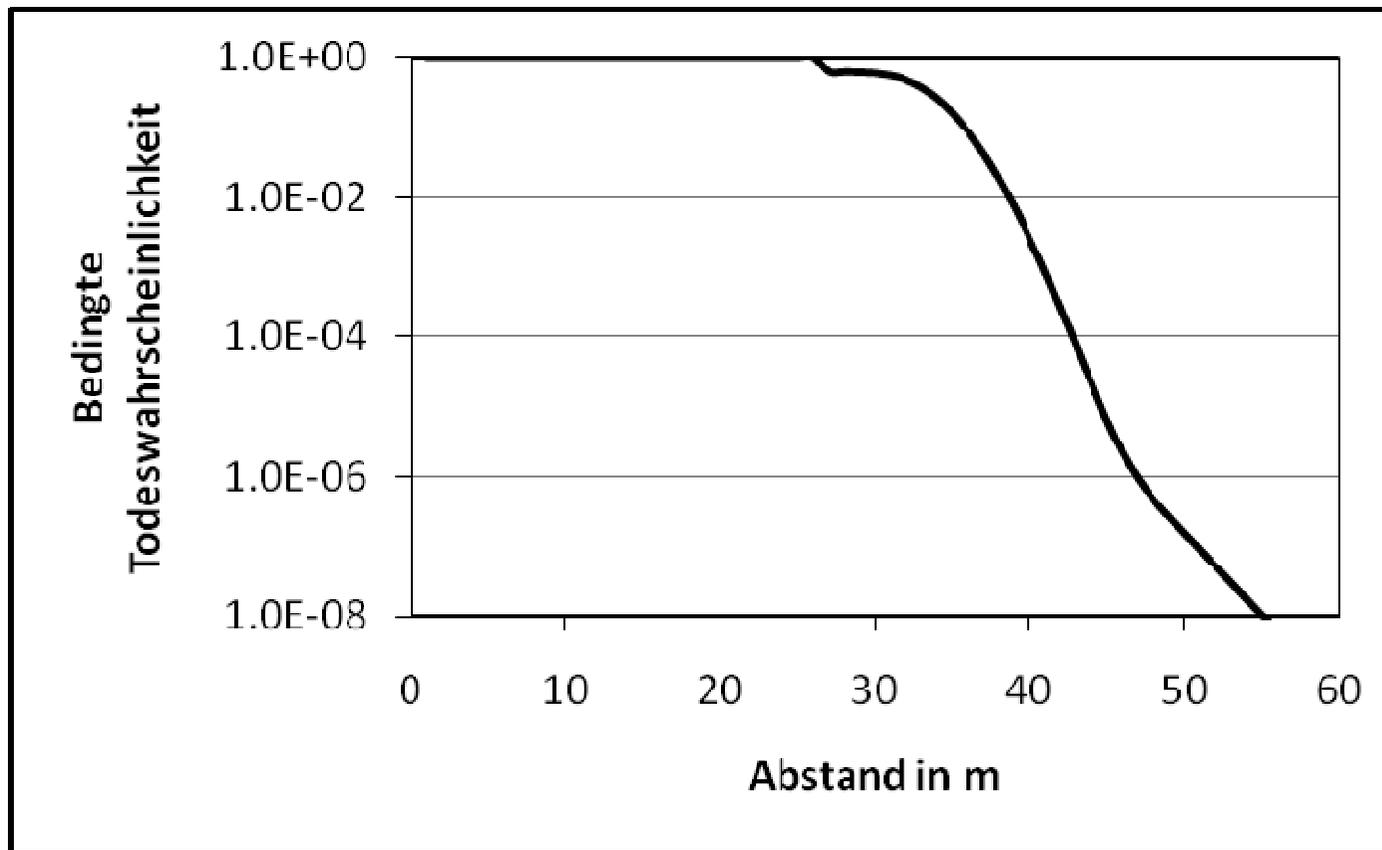
---

- Versagen von Dreizugkesseln – schlagartige Verdampfung
- Fahrtreppe/Fahrsteige – Energieeinwirkung beim Sturz
- Turmdrehkran – Energieeinwirkung infolge Umfallens
- Windkraftanlage – Abriss eines Rotorflügels

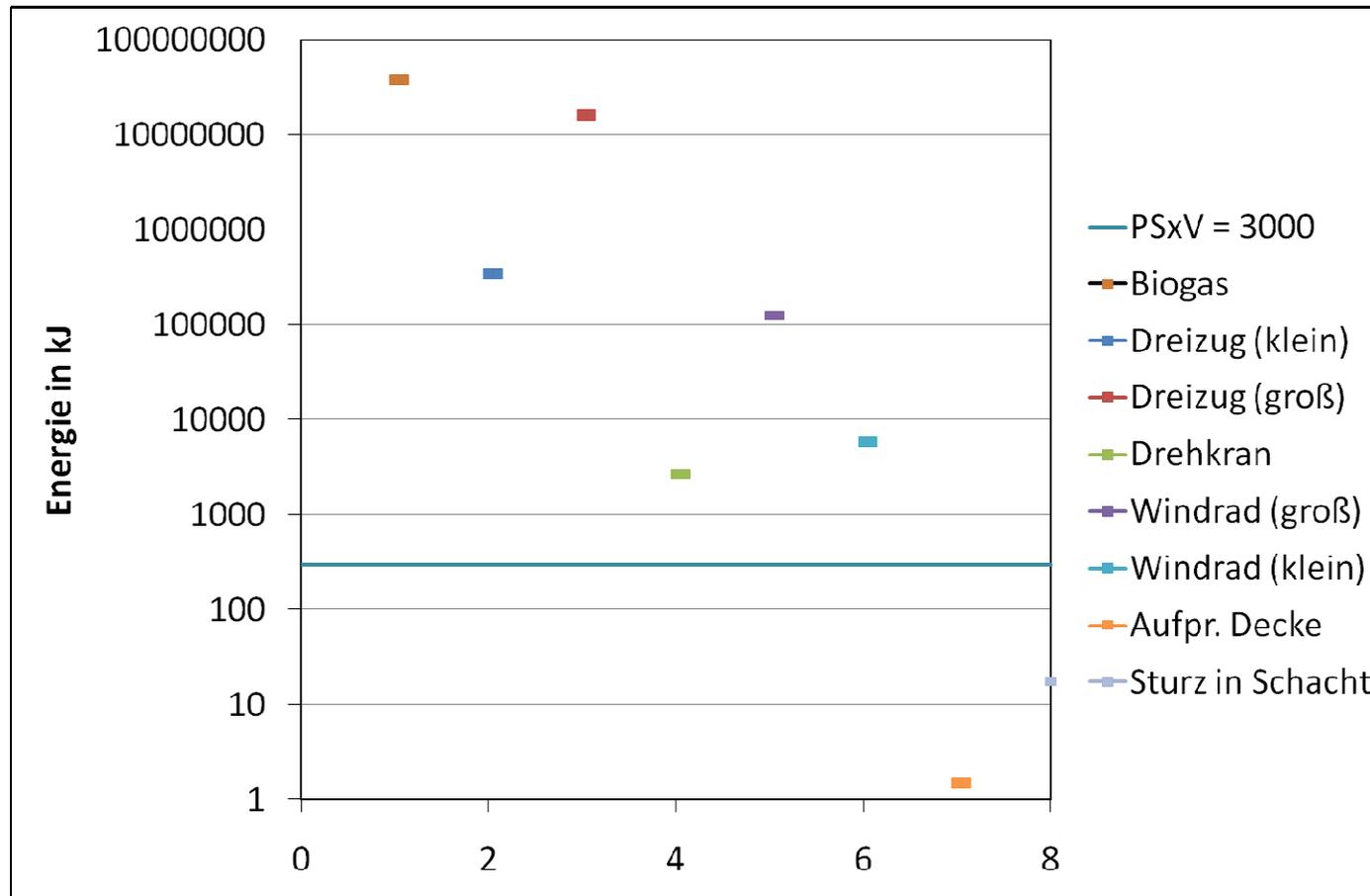
# Folgen des Versagens eines Dreizugkessels mit 112 m<sup>3</sup> Volumen und 31,7 bar



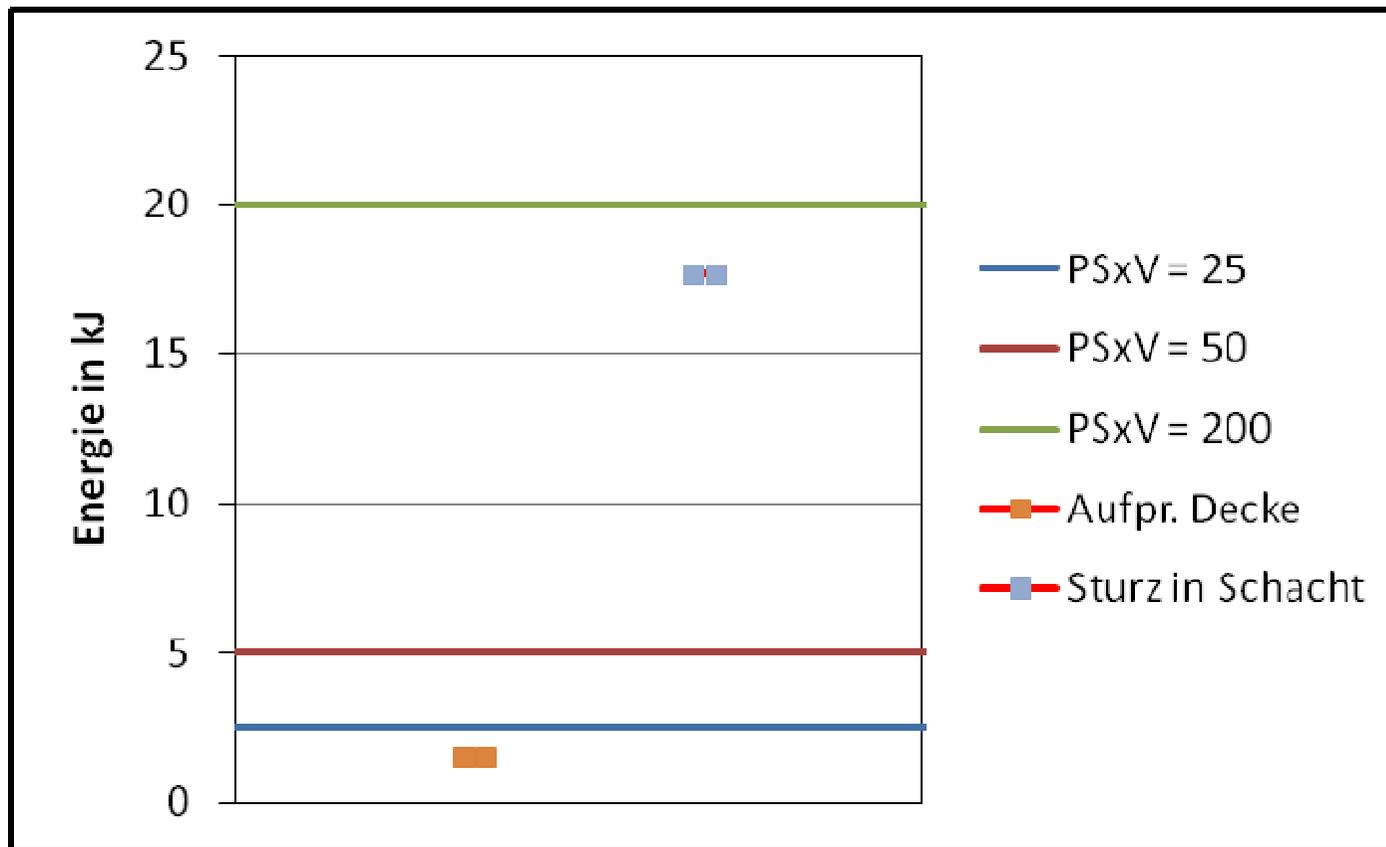
# Biogasanlage: Bedingte Todeswahrscheinlichkeit beim Zusammenwirken von Explosion und Gaswolkenfeuer



# Ergebnisse der Fallstudien und Vergleich mit $PS \times V = 3000 \text{ bar} \cdot \text{l}$ (300 kJ)



# Aufzugbezogene Ereignisse





## Zwischenrésumé

---

- Es ist offensichtlich, dass die Energieinhalte aller Objekte oberhalb des Druck-Inhaltsprodukts  $PS \times V = 3000 \text{ bar} \cdot \text{l}$  (300 kJ) liegen, der Untergrenze der Kategorie IV der Druckgeräterichtlinie.
- Eine Ausnahme bilden die Aufzüge/Rolltreppen, bei denen aber in der Regel die Gesamtenergie die betroffene Person beaufschlagt.
- Unfälle bei Aufzügen werden deshalb alternativ unter Nutzung des Räuber-Beute Modells bewertet.



# Ergänzende Vorgehensweisen

---

- Abschätzung des Risikos (risikobasierte Untersuchung)
- Räuber-Beute Modell
- Einfluss von Funktionsprüfungen und Instandsetzungen auf die Nichtverfügbarkeit technischer Systeme

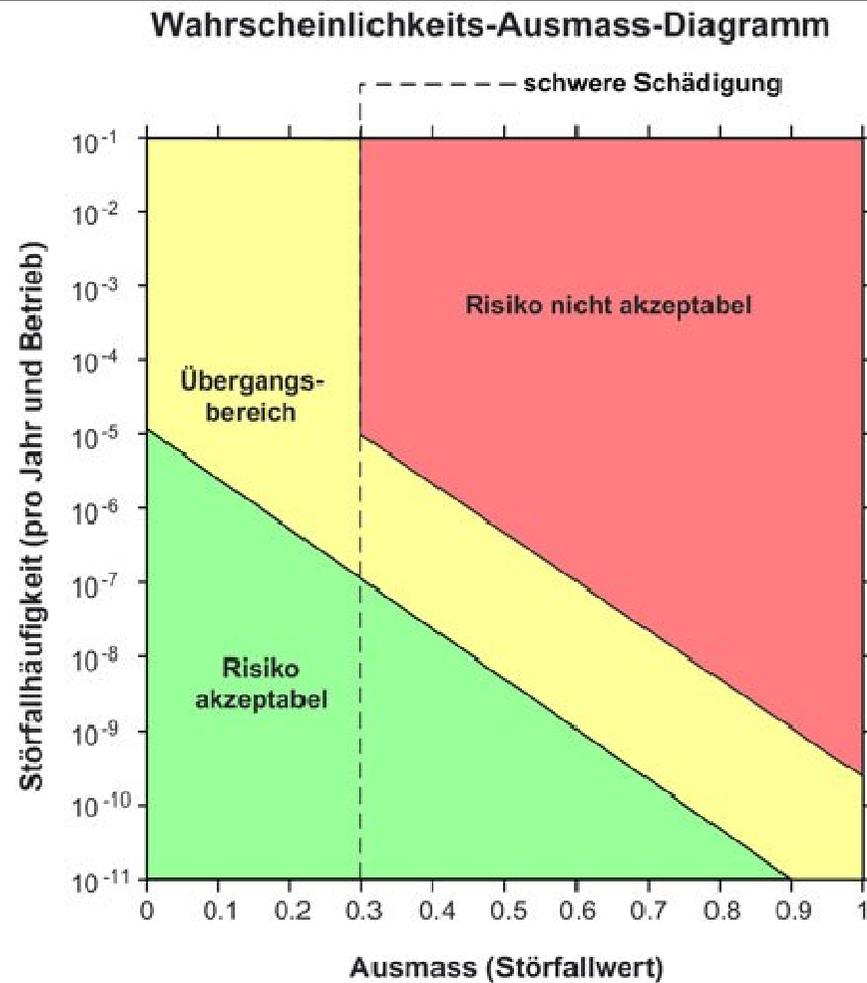


# Zukunftsweisend ist die Abschätzung des Risikos

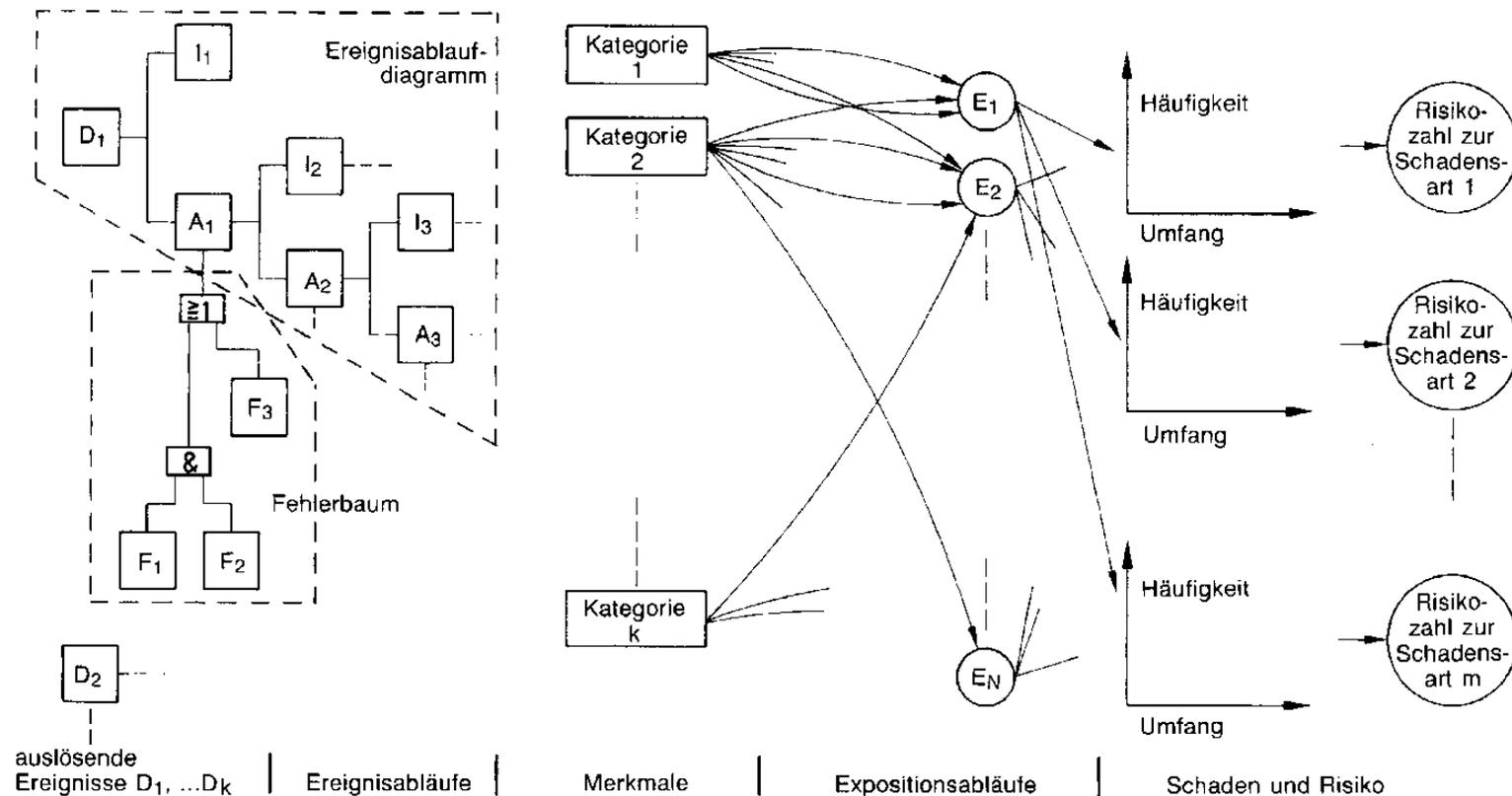
---

- Vorschlag für Risikogrenzwerte
  - Individualrisiko  $10^{-6} \text{ a}^{-1}$ , wie in den Niederlanden
  - Kollektivrisiko: Schweiz

# Risikogrenzwerte für das Gruppenrisiko im Kanton Zürich

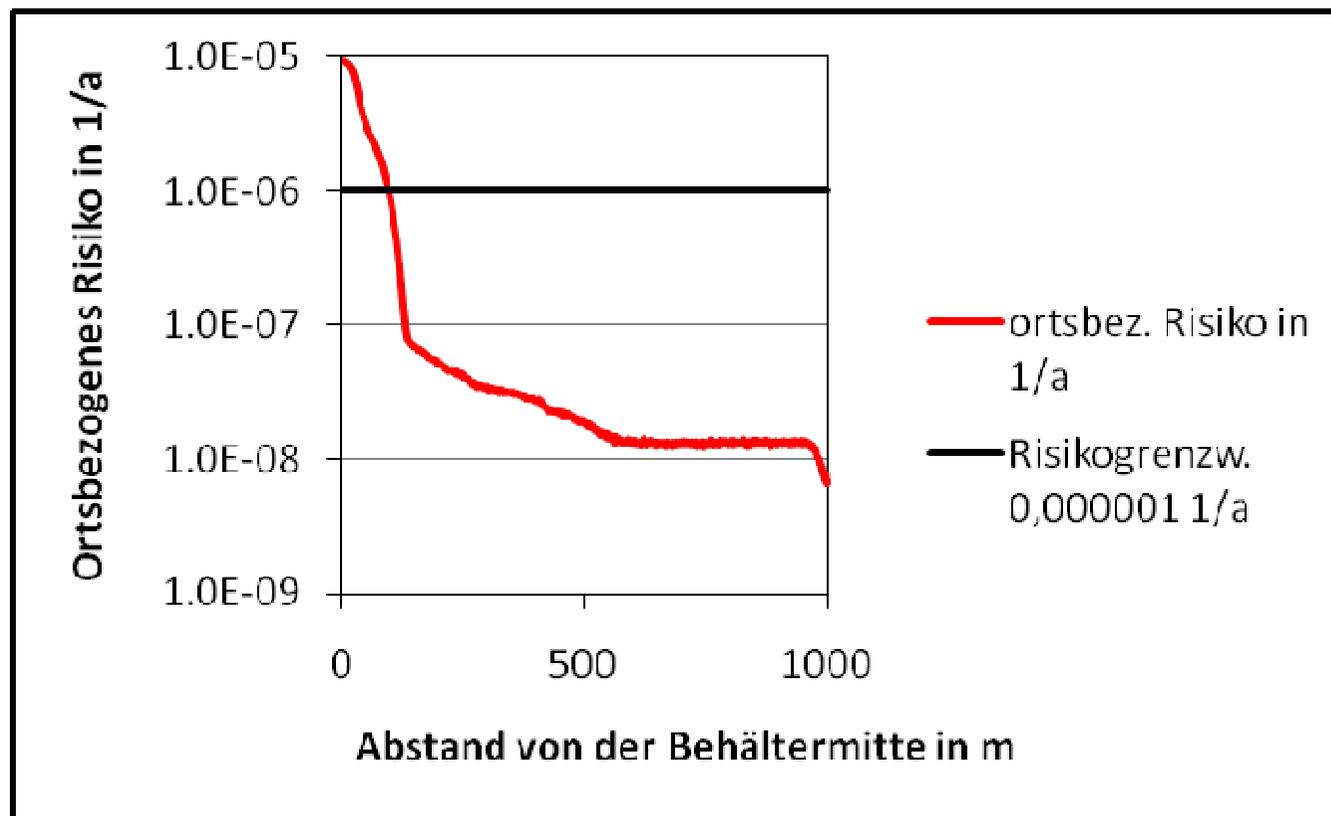


# Risikoermittlung für technische Anlagen

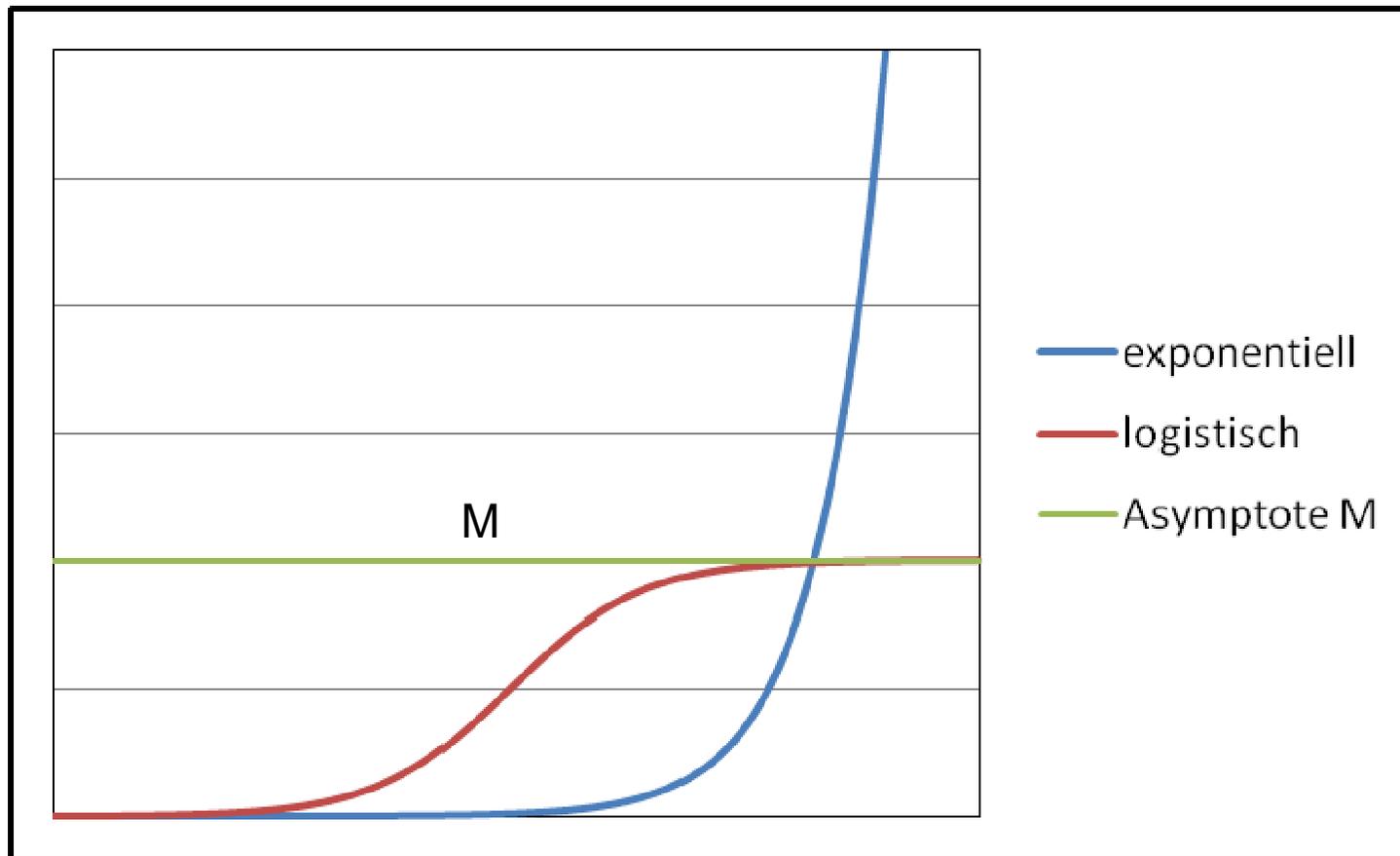


# Risiko aus einer Freisetzung aus dem Behälter einer Biogasanlage (756 kg Methan)

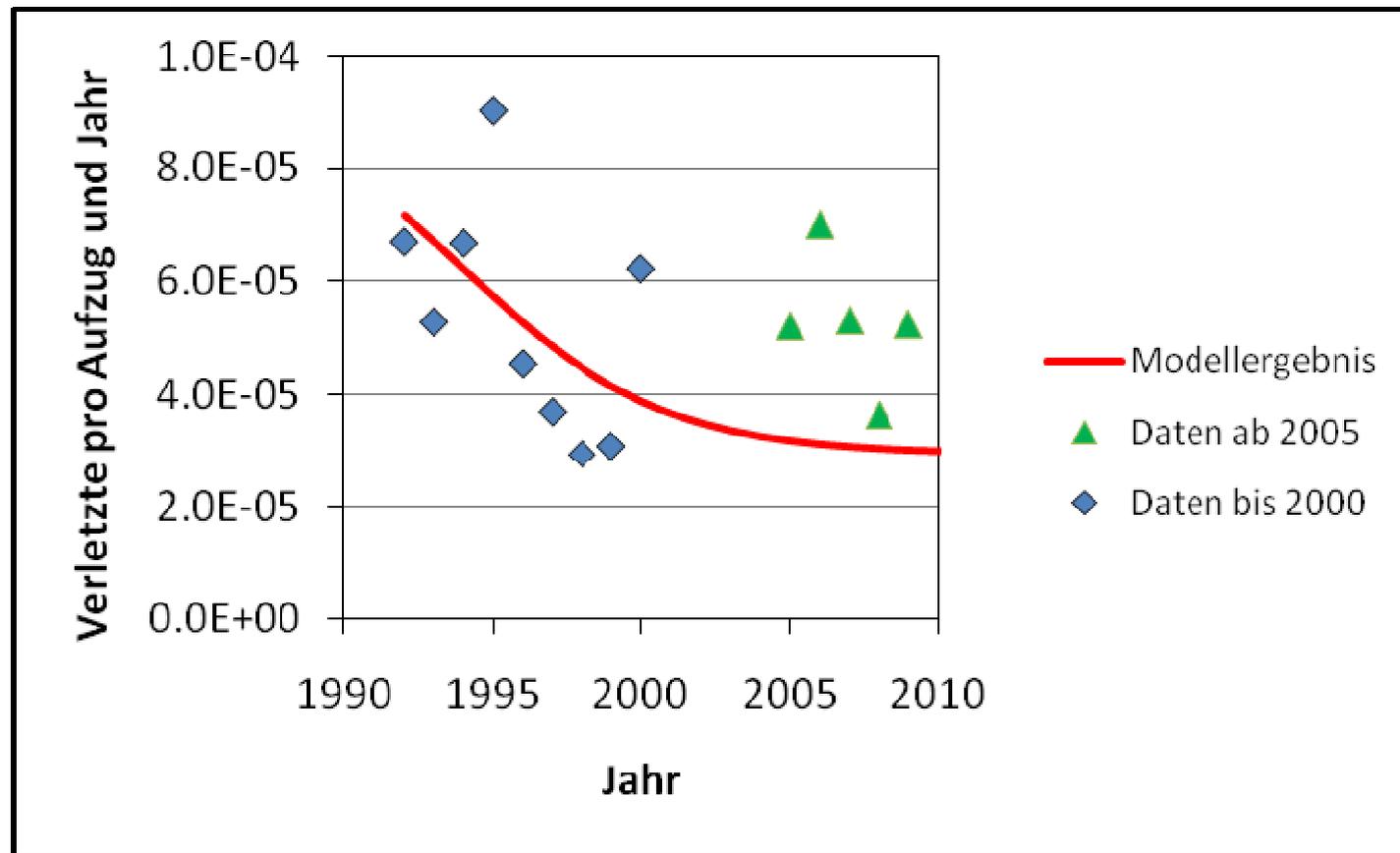
Erwartete Häufigkeit für Behälterversagen:  $50 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$



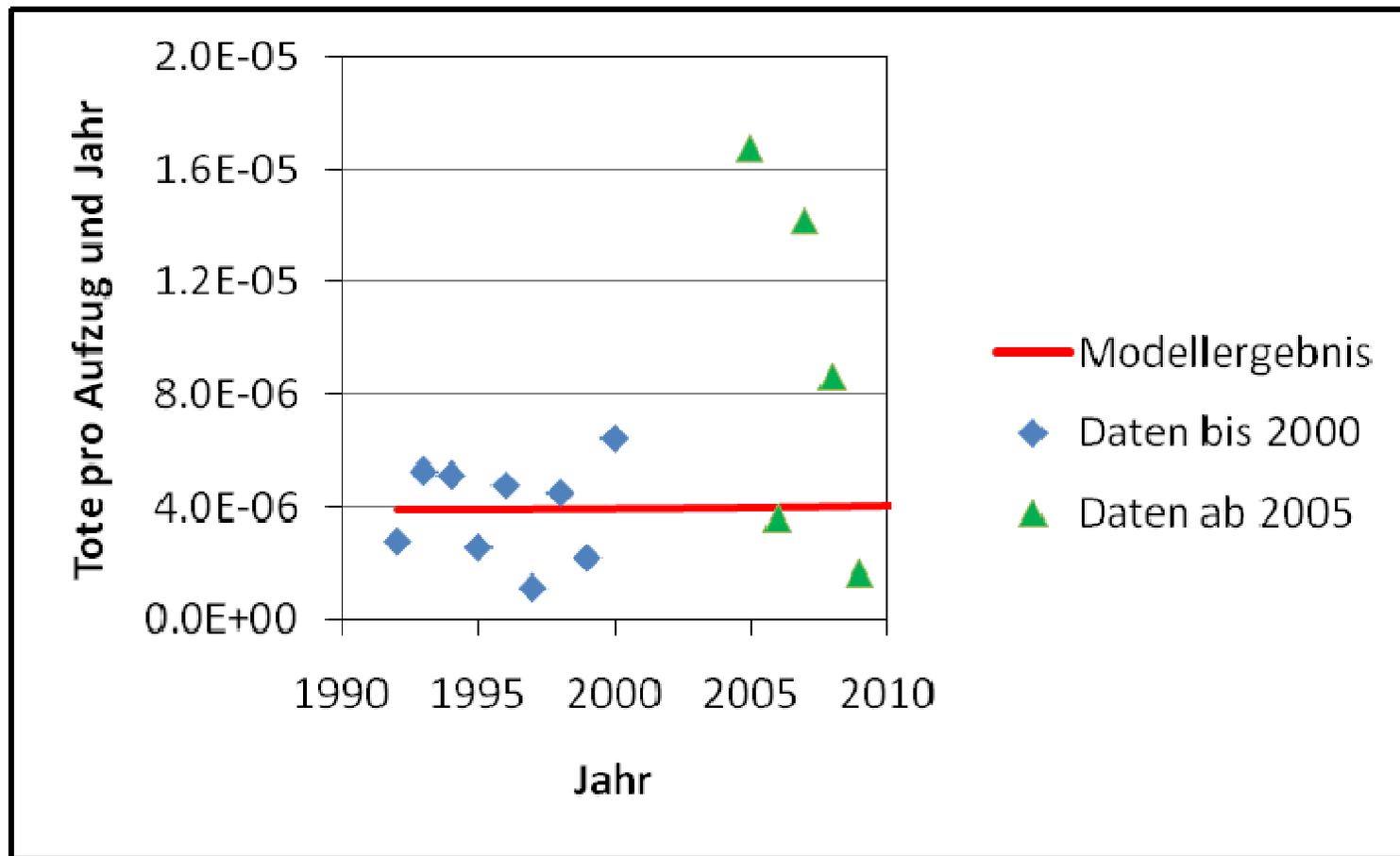
# Exponentielle und logistische (Räuber-Beute Modell) Kurve



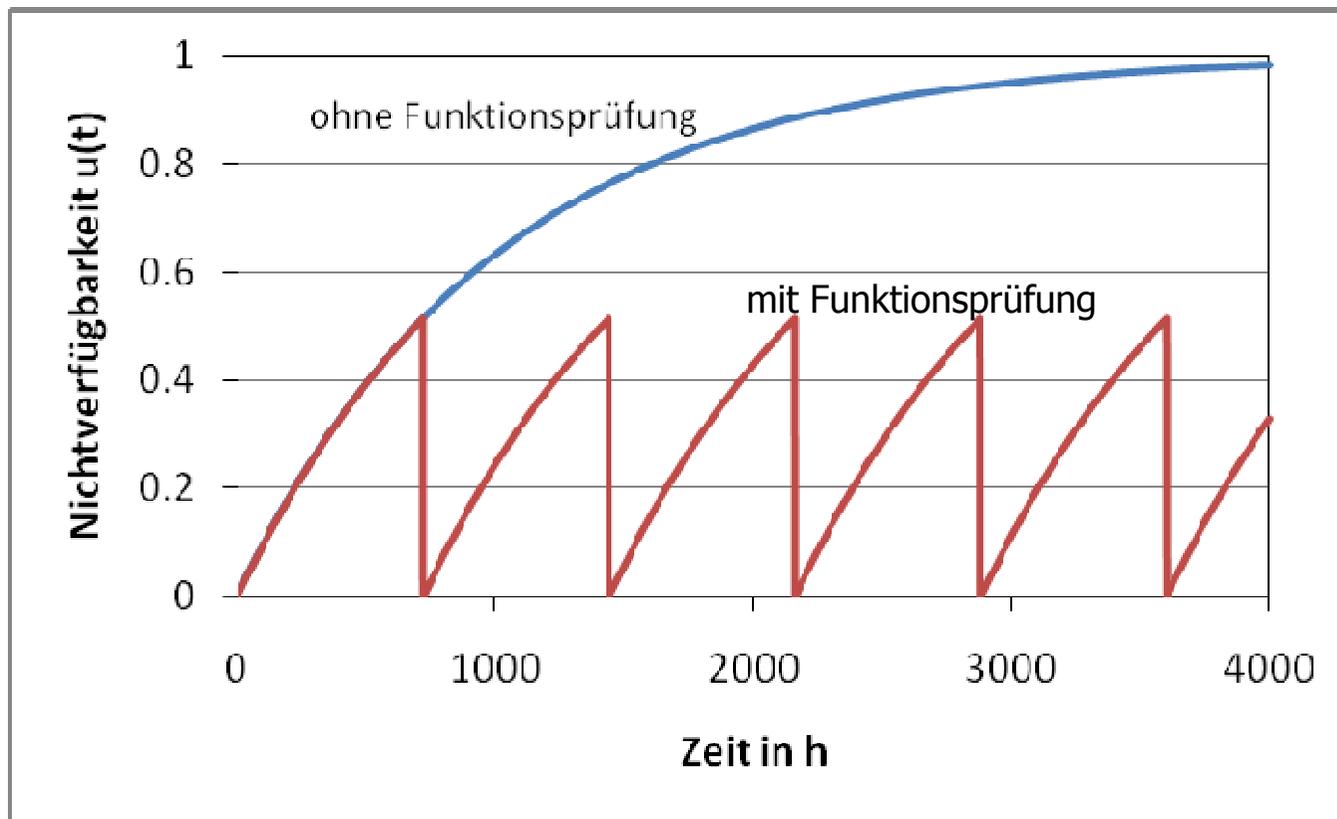
# Räuber-Beute Modell und Aufzüge: Verletzte



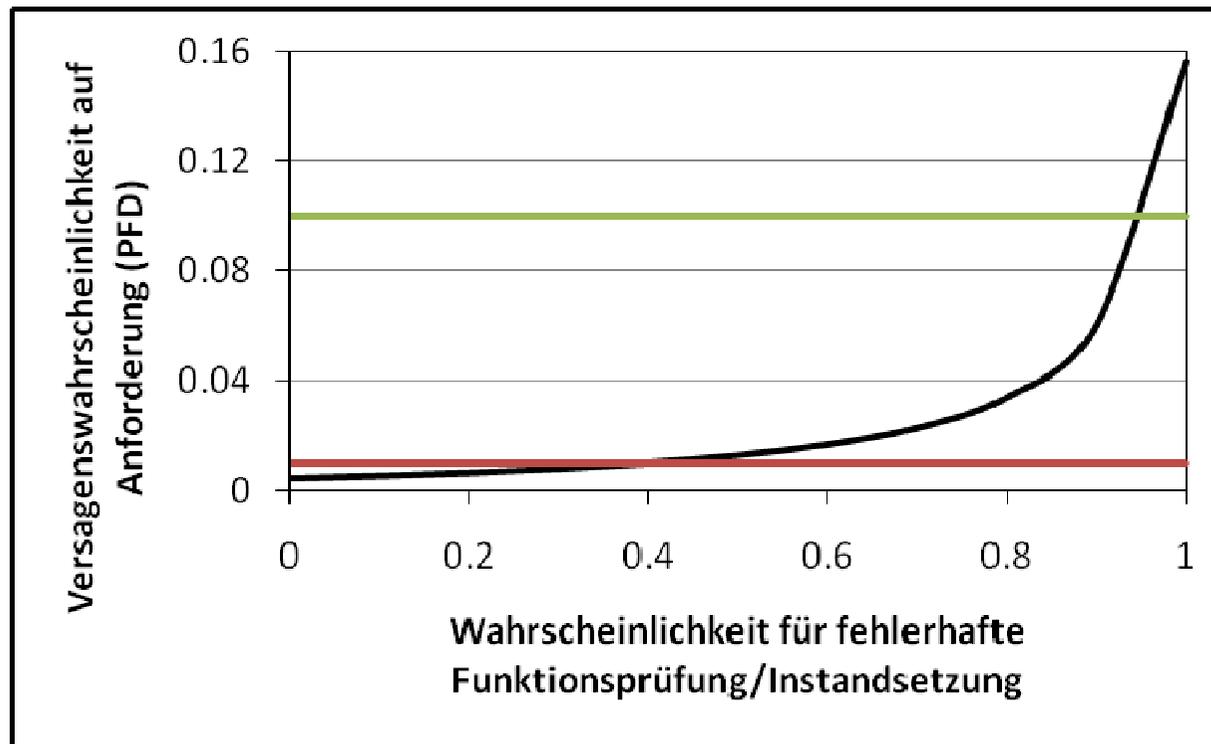
# Räuber-Beute Modell und Aufzüge: Tote



# Nichtverfügbarkeit ohne und mit (perfekter) periodischer Funktionsprüfung/Instandsetzung

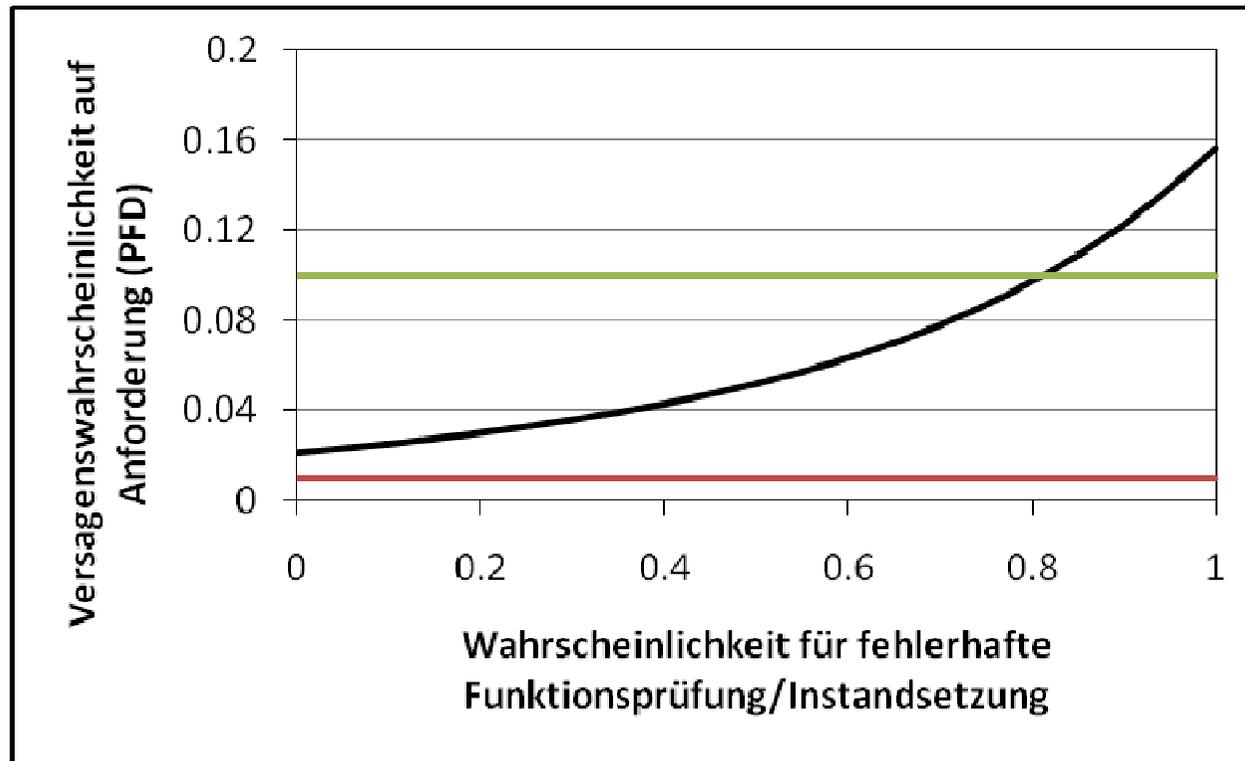


# Funktionsprüfungen und Nichtverfügbarkeit (1)



Nichtverfügbarkeit der Sicherheitsfunktion (Ausfallrate  $\lambda_s = 0,000001 \text{ h}^{-1}$ ) bei jährlicher Funktionsprüfung in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit eines Fehlers bei Funktionsprüfung oder Instandsetzung (grüne Linie: Obergrenze SIL-1; rote Linie: Obergrenze SIL-2)

## Funktionsprüfungen und Nichtverfügbarkeit (2)



Nichtverfügbarkeit der Sicherheitsfunktion (Ausfallrate  $\lambda_s = 0,000001 \text{ h}^{-1}$ ) bei fünfjähriger Funktionsprüfung in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit eines Fehlers bei Funktionsprüfung oder Instandsetzung (grüne Linie: Obergrenze SIL-1; rote Linie: Obergrenze SIL-2)



## Zusammenfassung und Wertung (1)

---

- Die Einordnung der Ergebnisse und ihre Beurteilung werden ermöglicht durch Vergleich mit
  - Grenzwerten aus der Druckgeräterichtlinie im Falle von Energie,
  - allgemein akzeptierten Grenzwerten, die zu vernachlässigbaren Folgen führen, oder entsprechenden Wahrscheinlichkeiten im Falle von Belastungen durch Druck oder Wärmestrahlung,



## Zusammenfassung und Wertung (2)

---

- Risikogrenzwerten, wie sie im europäischen Umfeld verwendet werden, falls das Risiko abgeschätzt wird,
- Dadurch sind mehrere Ebenen der Beurteilung vorhanden.
- Angepasst an das zu beurteilende Objekt kann dann die geeignete ausgewählt werden, wobei auch mehr als eine geeignet sein können.



## Zusammenfassung und Wertung (3)

---

- Sämtliche betrachteten Objekte liegen oberhalb  $PS \times V = 3000$
- Aufzüge, Fahrtreppen etc. bilden eine Ausnahme, aber die Einwirkung erfolgt direkt auf den Benutzer; daher
  - Räuber-Beute Modell



## Zusammenfassung und Wertung (4)

---

- Fehler bei der Funktionsprüfung/Instandsetzung können dazu führen, dass die lebenslang aufrechtzuerhaltende SIL-Klassifizierung nicht eingehalten wird.
- Die Norm legt nahe, dass Prüfungen durch unabhängige Dritte durchgeführt werden sollen.