

Risikoorientierte Instandhaltungsoptimierung von Mittelspannungskabeln



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Jochen Bühler

Inhalt

1. Motivation

2. Aufbau von MS-Kabelanlagen

3. Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen

4. Optimaler Einsatz des Erneuerungsbudgets

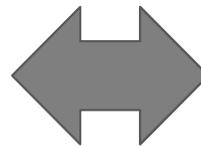
5. Zusammenfassung

Motivation

Spannungsfeld

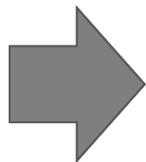
Ausgabenanstieg

- Netzausbau 60er & 70er
- Erneuerungsberg
- Hohe Zuverlässigkeit



Kostendruck

- Liberalisierung 1998
- Anreizregulierung 2009
- Pönalen 2012



Risikoorientierte Instandhaltung

- Erkennung von Schwachstellen
- Größter Nutzen für Budget

Motivation



Ziel: Risikoorientierte Erneuerung von MS-Kabel

Begründung

- 90% aller Kundenausfälle sind auf MS zurückzuführen
- Hauptfehlerquelle in MS: Kabel

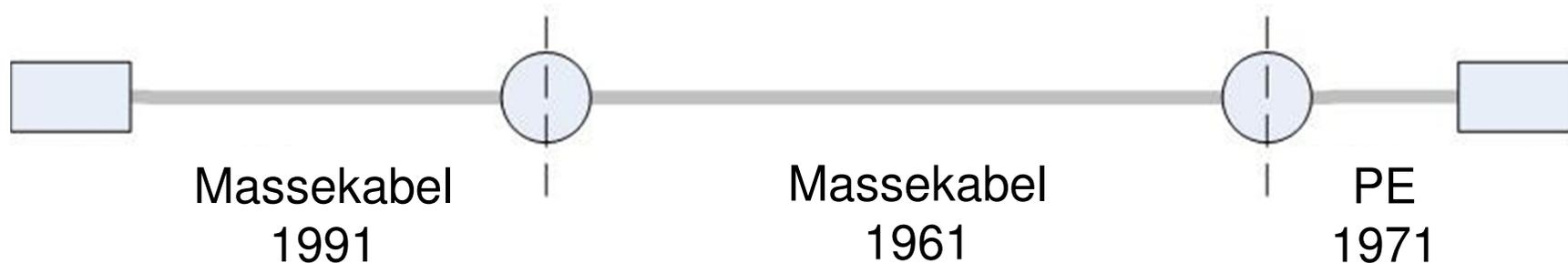
Problematik

- Zustandsbewertung nötig
- Inspektion (und Wartung) nur in Ausnahmefällen möglich
- Tests zur Zustandsprüfung i.d.R. nicht wirtschaftlich

Aufbau von MS-Kabelanlagen

Netze sind historisch gewachsen

- Unterschiedliche Kabel-Generationen



- Traditionell: Ereignisorientierte Instandhaltung
- Unterschiedliche Verlegungsumgebungen



Berücksichtigung von Teilerneuerungen!

Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen



Kosten

- Kabel- und Tiefbaukosten → statistische Daten
- Tiefbaukosten abhängig von Verlegungsort

Nutzen

- Differenz aus Schadensrisiko vor und nach Maßnahme
- Vergleichbarkeit von Kabeln: Bezug auf Gesamtlänge
- Definition:

Risiko = Schadenswahrscheinlichkeit x Schadenskonsequenz

Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen



- Hier: Risiko = Schadensrate (λ) x Schadenskosten (sk)
- Grundlage: FGH Studie 299 zum Langzeitverhalten von Kabeln

$$R(i, j, t_1, \dots, t_i, \ell_1, \dots, \ell_i) = \sum_i sk_{K,i} \cdot \lambda_{K,i}(t_i) \cdot \ell_i + \sum_j sk_{G,j} \cdot \lambda_{G,j}$$

i = Kabelanzahl;

j = Garniturenanzahl;

K = Kabel;

G = Garnitur;

t = Kabelalter;

ℓ = Kabellänge

Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen



Kabel

Einflüsse auf Gesamtschadensrate

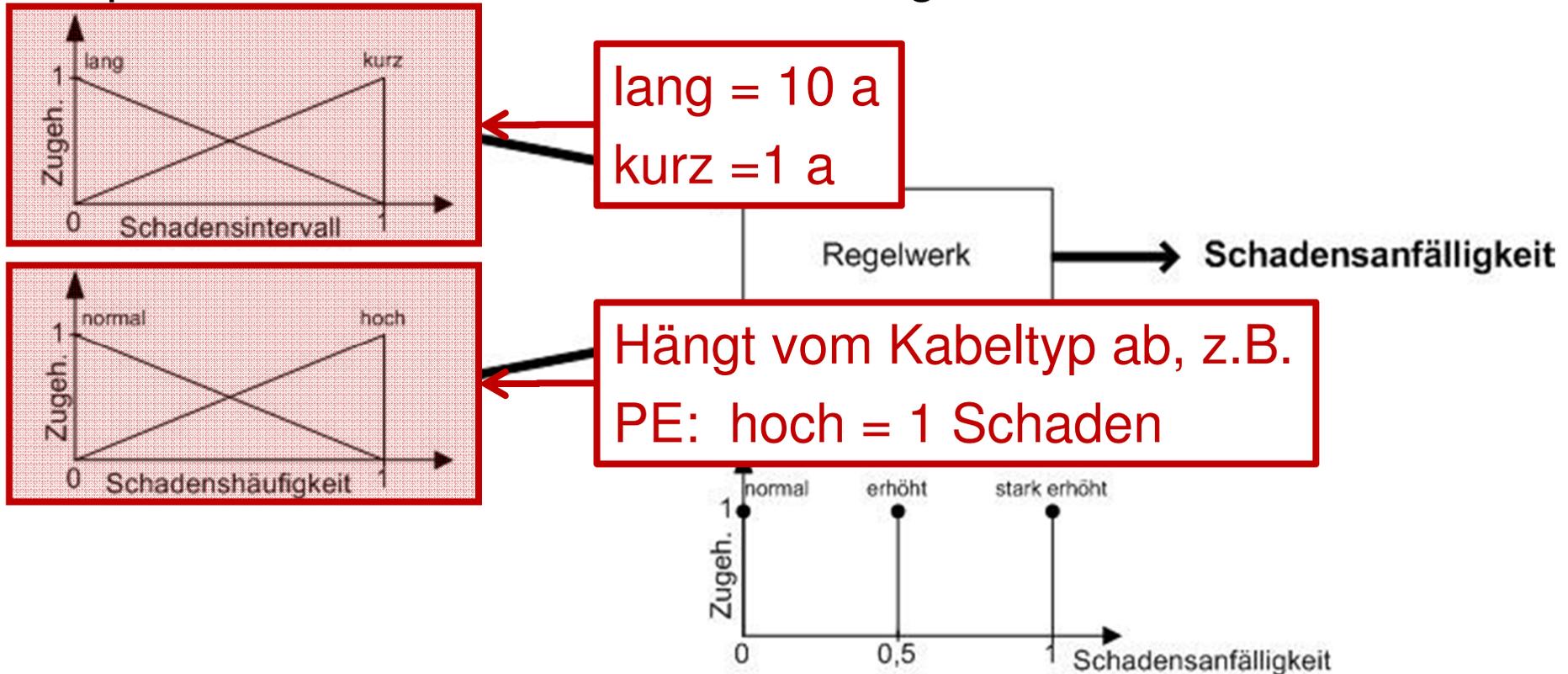
- Alterung (Alt) → Studie
- Fremdverursachte Schäden (Ext) → Studie
- Außergewöhnliche Eigenschaften (AE) → Benutzerdefiniert
- Schadensanfälligkeit in der Vergangenheit (SA) → **Fuzzy-Logik**

$$\lambda_K(t) = \lambda_{K,Alt}(t) \cdot (1 + SA + AE) + \lambda_{K,Ext}$$

Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen

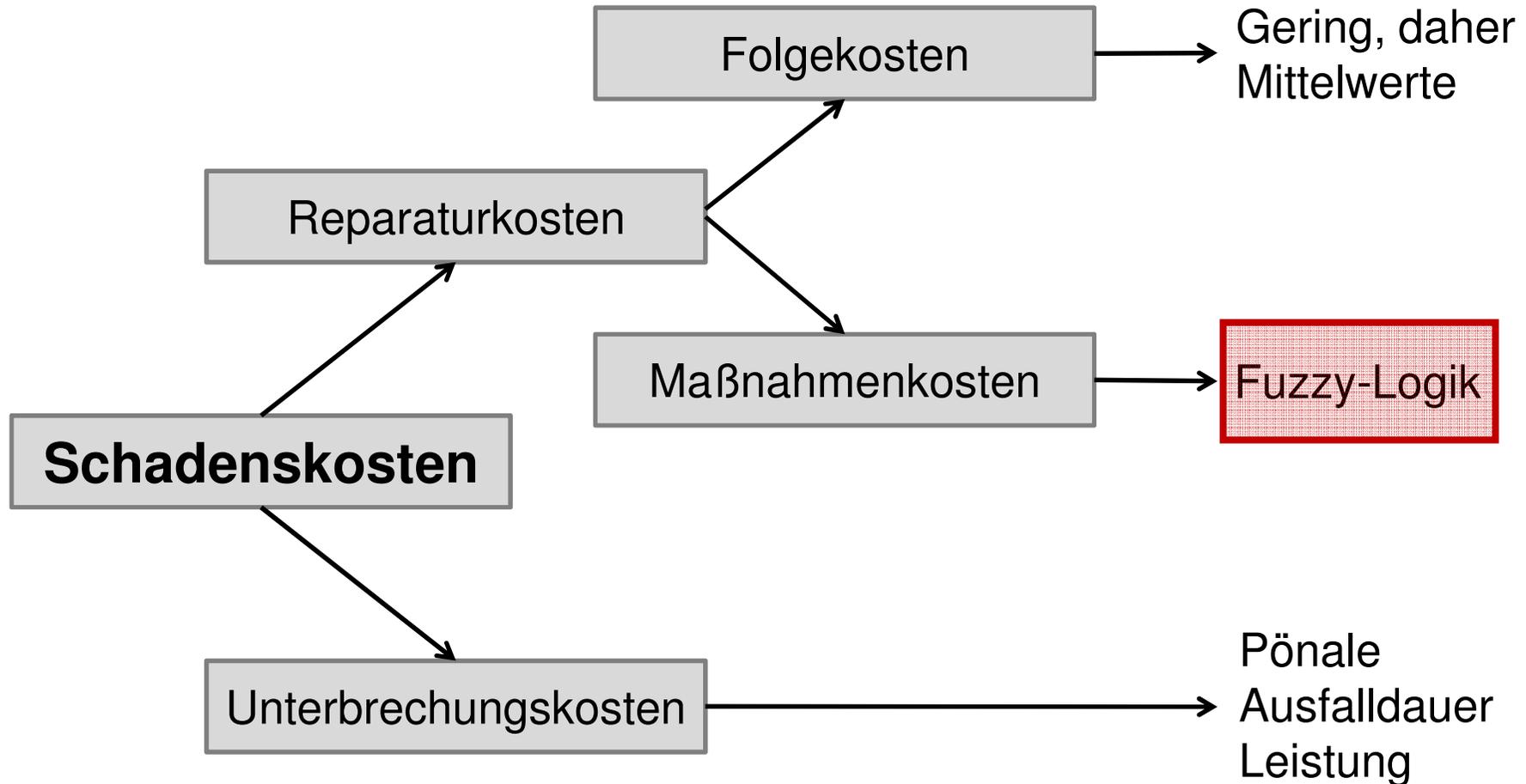
Fuzzy-Logik-Modell

Experten: Schadensintervall stärker gewichtet



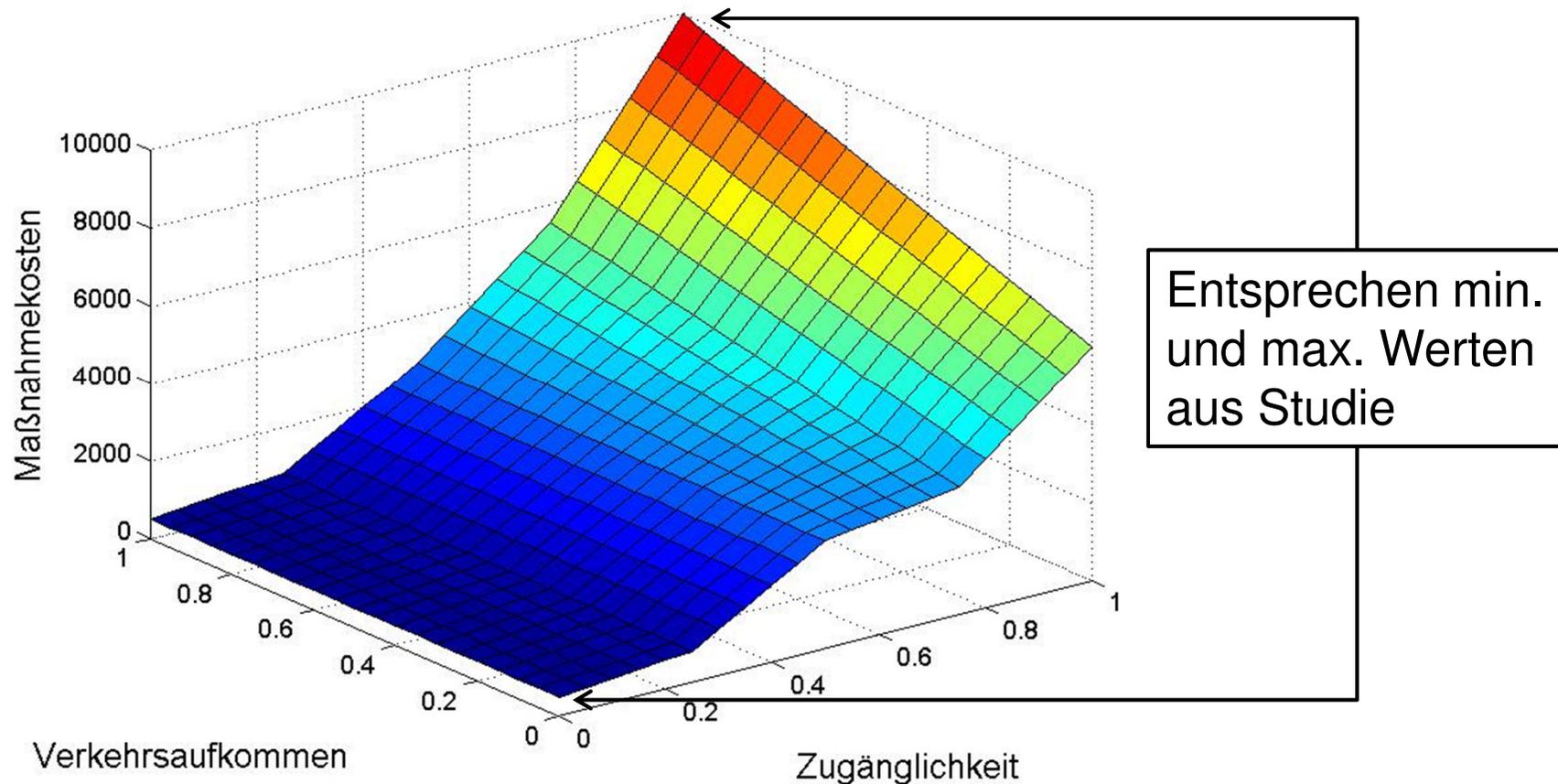
Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen

Schadenskosten



Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen

Fuzzy-Logik-Modell für Massekabel

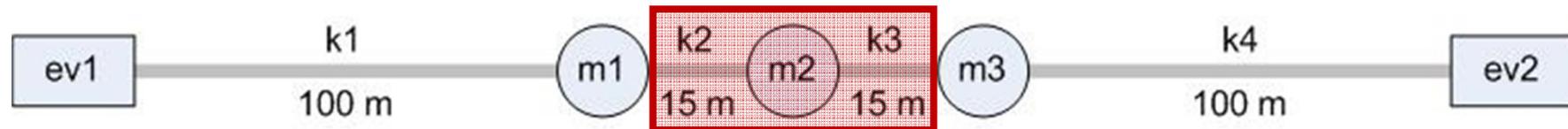


Optimaler Einsatz des Erneuerungsbudgets

Demonstration der Funktionsweise des Modells

Ziel: Bestimmung optimaler Erneuerungsmaßnahme

Annahme: Kabel identisch (Verlegungsumgebung, etc.)



	Abschnitt	ΔR [€/ (km · a)]	K [k€]	$\Delta R/K$ [1/(km · a)]
1	k2 + m2 + k3	172,36	4,43	0,0389
...
4	k1	697,17	33,96	0,0205
...
15	k2	4,31	2,21	0,001947

Optimaler Einsatz des Erneuerungsbudgets



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Analyse eines real existierenden Ringnetzes

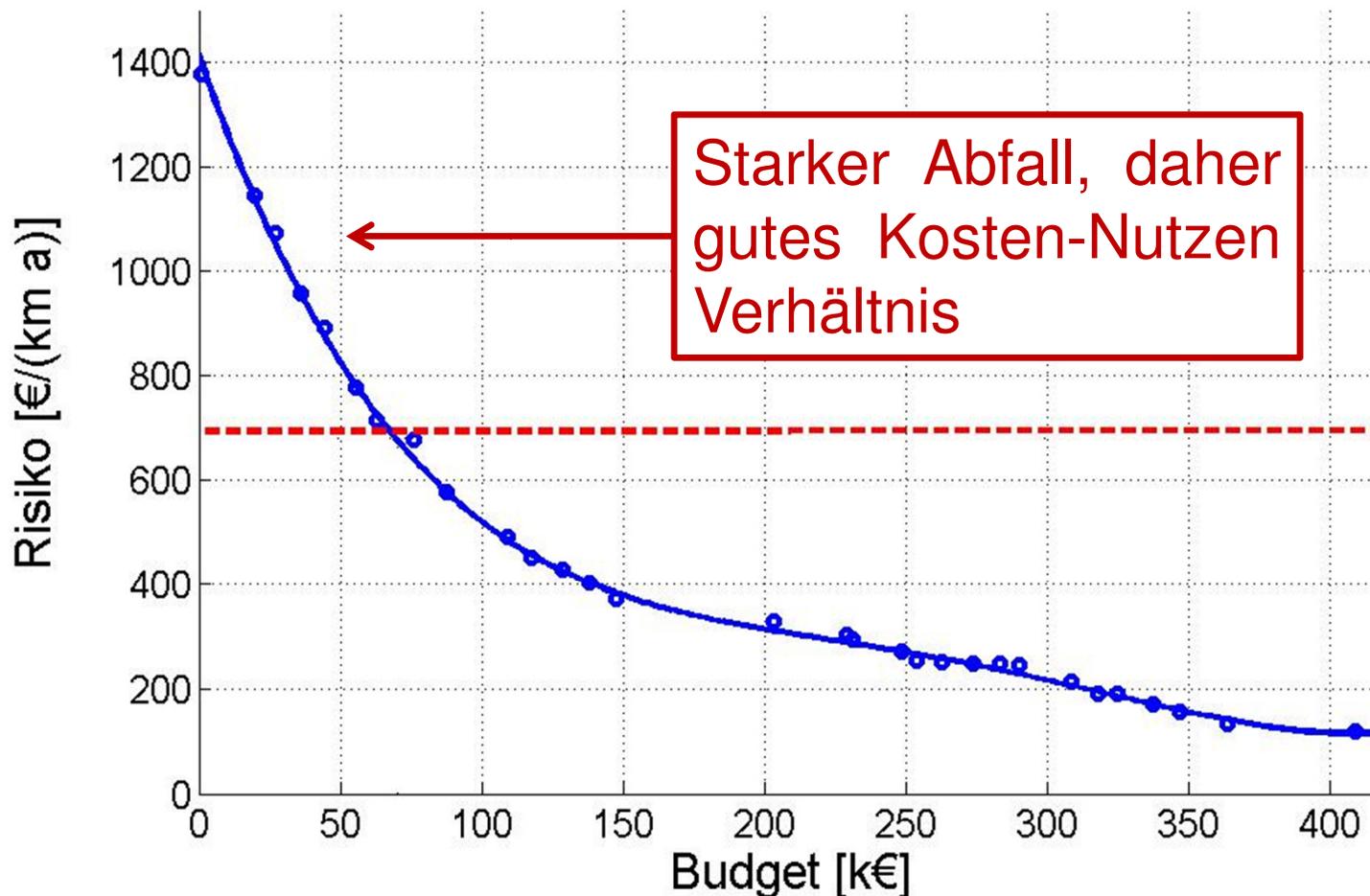
Ziel: Gewinnung allgemeiner Erkenntnisse

Netzdaten:

- 10 Ortsnetzstationen
- 77% Masse-, 19% PE- und 4% VPE-Kabel
- Schadenshistorie nicht bekannt
- Keine Feststellung außergewöhnlicher Kabeleigenschaften

Optimaler Einsatz des Erneuerungs- budgets

Insgesamt wurden 3443 Erneuerungsoptionen analysiert



Optimaler Einsatz des Erneuerungsbudgets



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Erkenntnisse

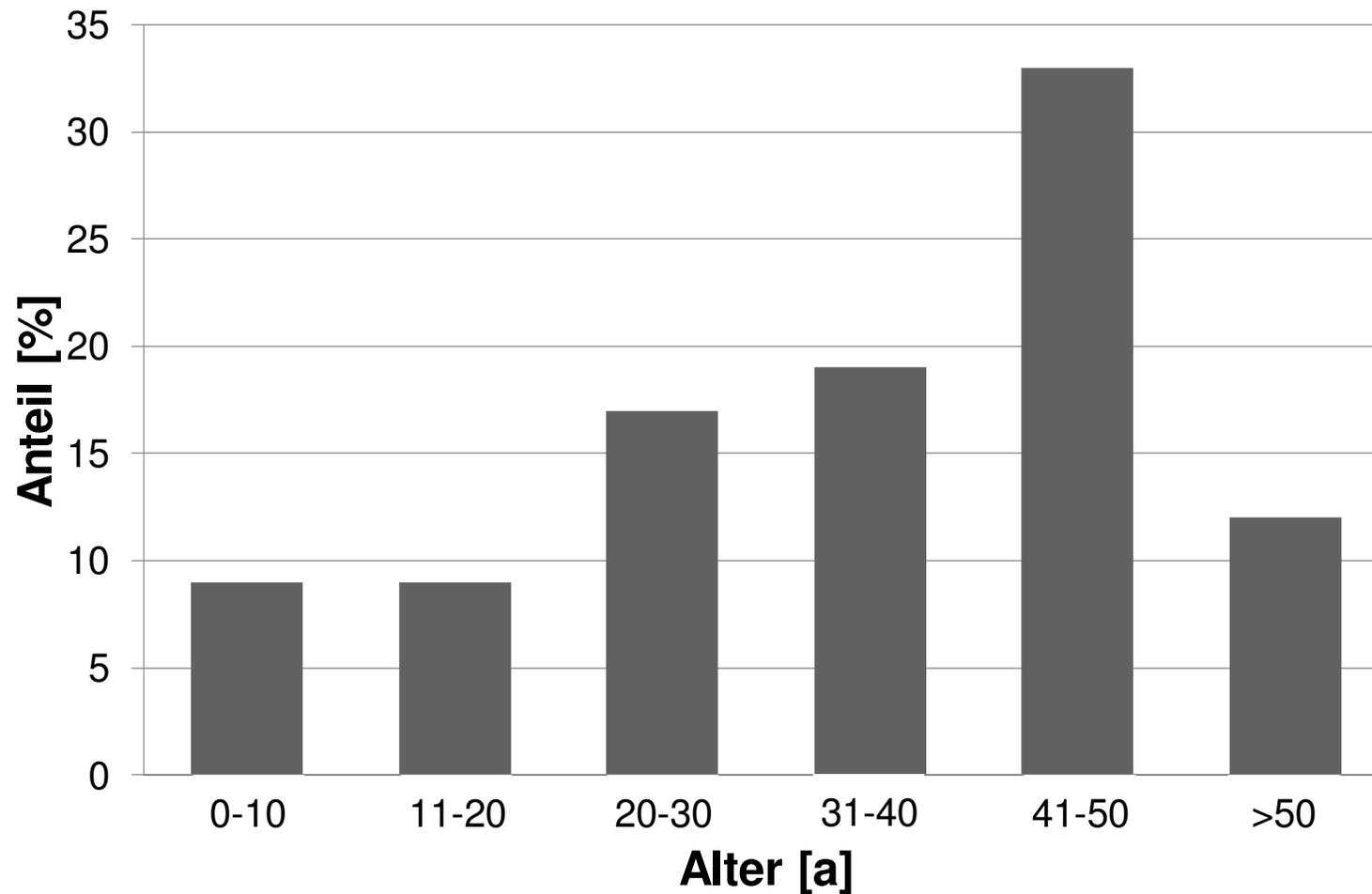
- Unterbrochene Leistung bestimmt maßgeblich Kabelpriorität
 - ➔ Unterbrechungskosten >> Reparaturkosten
- Hohe Erneuerungspriorität von PE, PVC & alten VPE Kabeln
 - ➔ Im Vergleich sehr hohe Schadensraten
- Kurze segmentierte Kabel sind langen vorzuziehen
 - ➔ Reduzierung von Muffen bei geringen Kosten

Zusammenfassung

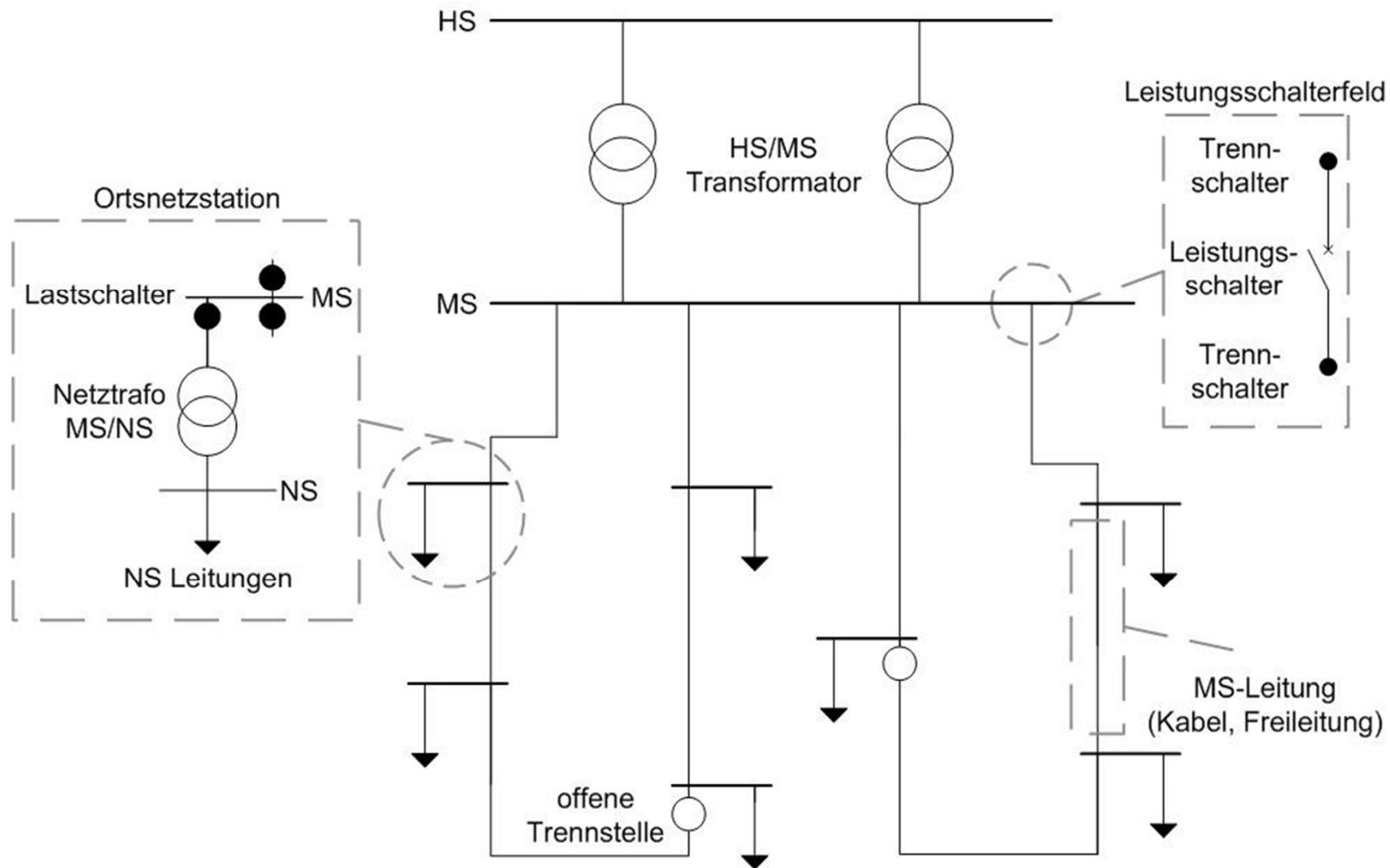
- Spannungsfeld: Erneuerungsberg – Liberalisierung
- Lösungsansatz: Risikoorientierte Erneuerung von MS-Kabeln
- Maximaler Nutzen für gegebenes Budget
- Bewertung Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungen
 - Kosten: Kabelkosten und Tiefbaukosten
 - Nutzen: Absenkung des Schadensrisikos
- Anwendung auf real existierenden Netzausschnitt
- Gewinnung allgemeine Erkenntnisse

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

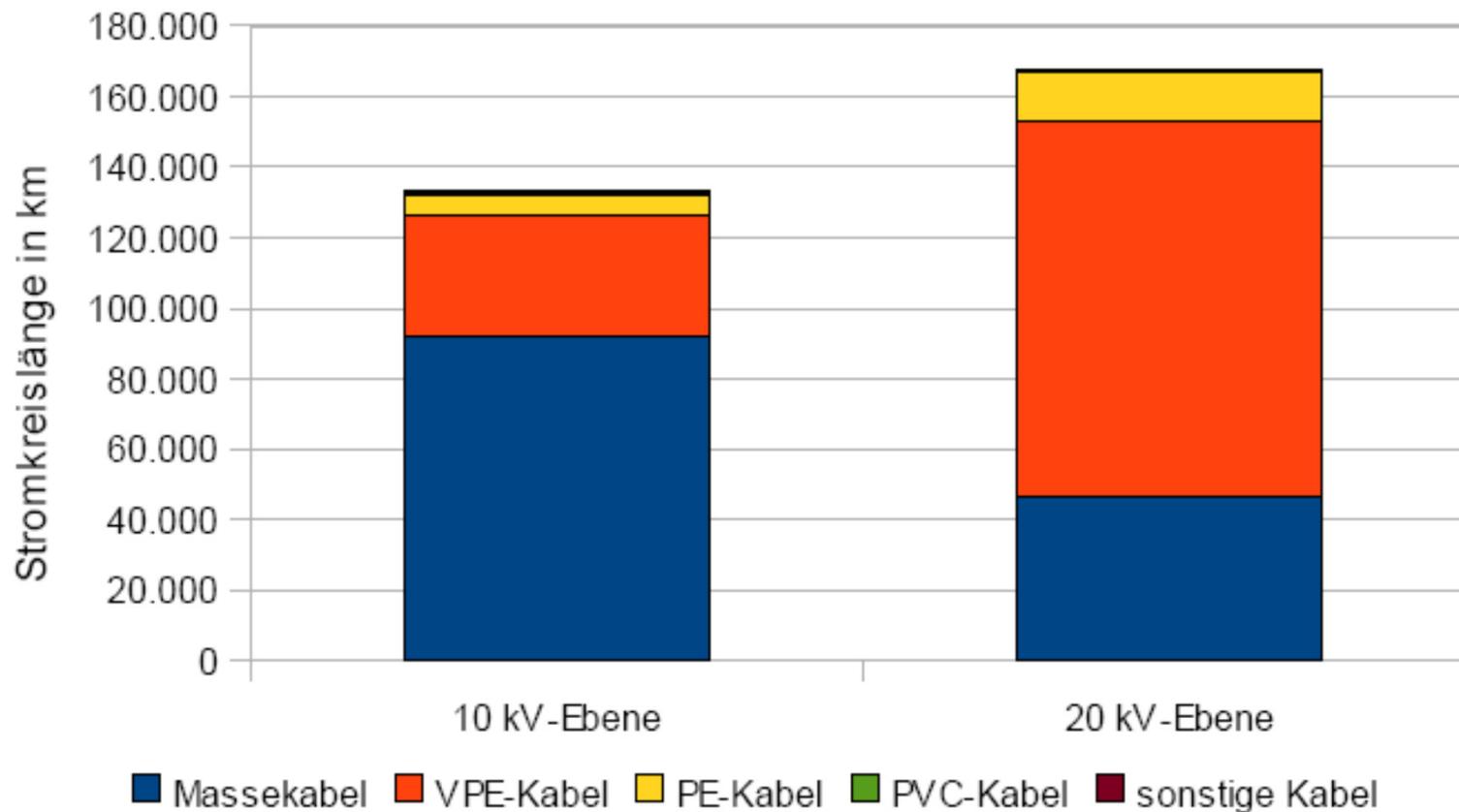
Altersstruktur der Kabel eines städtischen Verteilungsnetzes



Prinzipieller Aufbau eines Mittelspannungsnetzes



Stromkreislängen von Mittelspannungskabeln



Gesamtrisiko

$$R_{\text{Ges}}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) = R_{\text{EAS}}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) + R_{\text{VHA}}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i)$$

$$R_{\text{EAS}}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) = \sum_i \text{sk}_{\text{EAS-K},i} \cdot \lambda_{\text{EAS-K},i}(t_i) \cdot l_i + \sum_j \text{sk}_{\text{EAS-G},j} \cdot \lambda_{\text{EAS-G},j}$$

$$R_{\text{VHA}}(i, j, t_1, \dots, t_i, l_1, \dots, l_i) = \sum_i \text{sk}_{\text{VHA-K},i} \cdot \lambda_{\text{VHA-K},i}(t_i) \cdot l_i + \sum_j \text{sk}_{\text{VHA-G},j} \cdot \lambda_{\text{VHA-G},j}$$

$$\Delta R'_{\text{Ges}} = \frac{\Delta R_{\text{Ges}}}{l_{\text{Ges}}} = \frac{R_{\text{Ges,Vor}} - R_{\text{Ges,Nach}}}{l_{\text{Ges}}}$$

Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen

Kosten

- Summe aus Kabel- und Tiefbaukosten
- Mittlere Kabel- und Tiefbaukosten aus statistischen Daten
- Tiefbaukosten: Berechnung mit Werten in Tabelle

Verlegungsort	Tiefbaukosten
Unversiegelter Boden	90 €/m
Versiegelter Boden & niedriges Verkehrsaufk.	110 €/m
Versiegelter Boden & hohes Verkehrsaufk.	200 €/m

Quelle: Consentec

Kosten-Nutzen-Verhältnis von Erneuerungsmaßnahmen

Schadenrate

G

Studien: Übergangsmuffen entsprechen Muffen von Massekabeln

Zeitlich konstant

	Kabel	Garnitur
Masse	EAS, VHA	EAS, VHA
VPE	EAS, VHA	EAS, VHA
PE, PVC	Mittelwert	

↑ Verhältnis: 2/3 Endv. zu Muffe

EAS, VHA Verhältnis 75 pro km
Entspricht VPE

Zeitlich konstant

ngen & Altersabhängig

Entspricht VPE

Quellen: FGH & ETG

Schadensrate - Kabel

$$\lambda_{\text{EAS-K}}(t) = \lambda_{\text{EAS-K,Alt}}(t) \cdot (\text{gew}_{\text{Alt}} + \text{SA} \cdot \text{gew}_{\text{SA}} + \text{AE} \cdot \text{gew}_{\text{AE}}) + \lambda_{\text{EAS-K,Ext}} \cdot \text{gew}_{\text{Ext}}$$

$$\lambda_{\text{VHA-K}}(t) = \lambda_{\text{VHA-K,Alt}}(t) \cdot (\text{gew}_{\text{Alt}} + \text{SA} \cdot \text{gew}_{\text{SA}} + \text{AE} \cdot \text{gew}_{\text{AE}})$$

Regelwerk Schadensanfälligkeit

Schadensintervall	Schadenshäufigkeit	Schadensanfälligkeit
lang	normal	normal
lang	hoch	erhöht
kurz	normal	stark erhöht
kurz	hoch	stark erhöht

Schadensrate Garnituren

VPE-Muffe

$$\lambda_{\text{EAS-G}} = \frac{21\%}{(13,9\% + 21\%)} \cdot 0,001127 \cdot \frac{1}{\text{km} \cdot \text{a}} \cdot \frac{1}{2,75} \text{km} = 2,47 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{a}}$$

VPE-Endverschluss

$$\lambda_{\text{EAS-G}} = \frac{13,9\%}{(13,9\% + 21\%)} \cdot 0,001127 \cdot \frac{1}{\text{km} \cdot \text{a}} \cdot 0,651 \text{km} \cdot \frac{1}{2} = 1,46 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{a}}$$

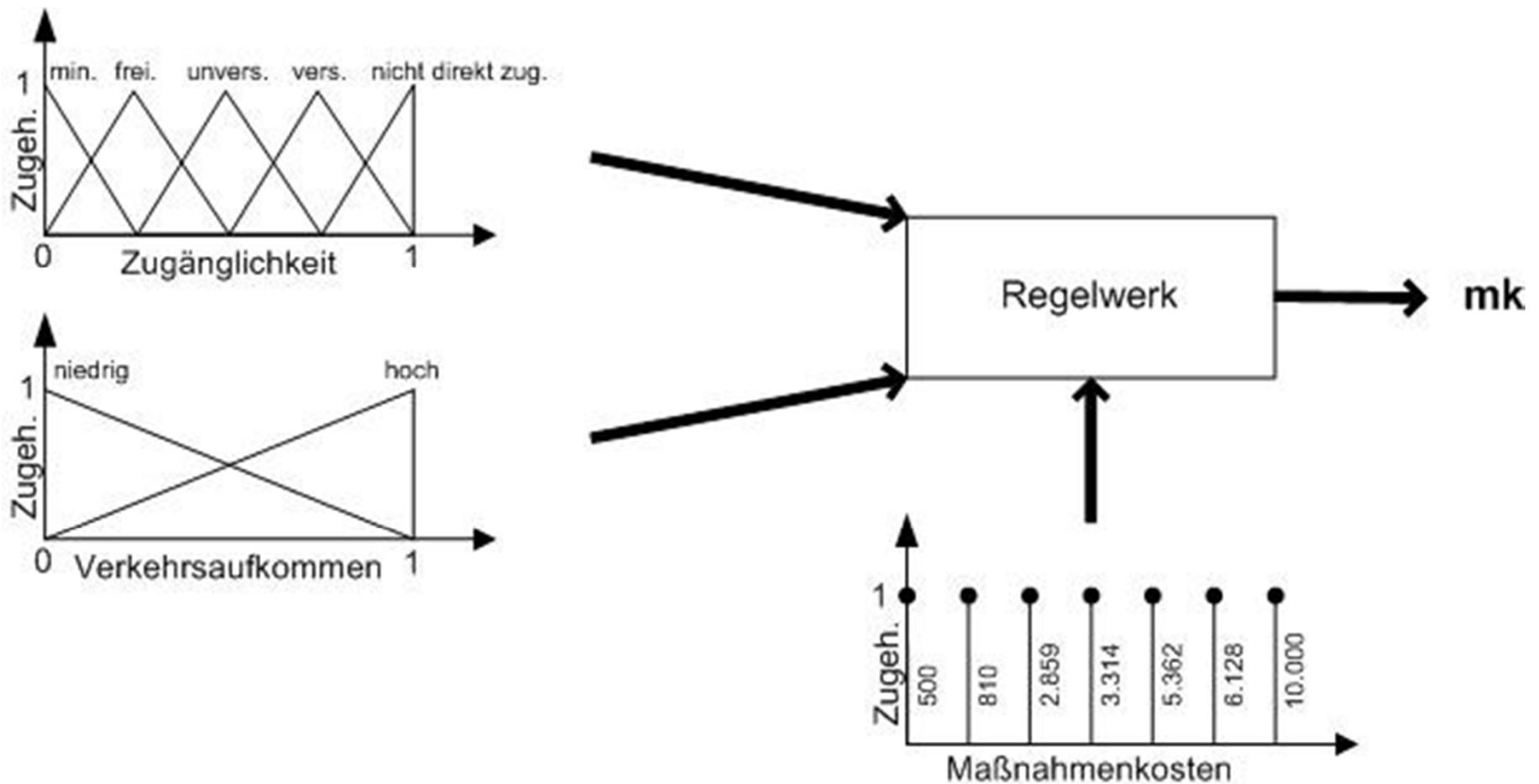
Schadensrate [1/a]	VPE-Kabel		Massekabel	
	Muffe	Endverschluss	Muffe	Endverschluss
EAS	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$
VHA	$8,69 \cdot 10^{-5}$	$5,15 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$

Regelwerk Maßnahmenkosten

Zugänglichkeit	Verkehr	VPE-Kabel [€]	Massekabel [€]
Minimaler Aufwand	-	300	500
Freiliegendes Kabel	-	810	810
Unversiegelter Boden	-	2.629	2.763
Versiegelter Boden	niedrig	3.147	3.266
	hoch	5.177	5.529
Nicht direkt zugänglich	niedrig	5.994	6.032
	hoch	9.000	10.000

Fuzzy Maßnahmenkosten

Massekabel



Ergebnisse

Schlussfolgerung	Begründung
Der Ersatz von Masseendverschlüssen bietet sich dann an, wenn die Länge des angeschlossenen Kabels bis zur nächsten Muffe nur sehr kurz ist (ca. 15 Meter).	VPE-Endverschlüsse weisen eine wesentlich niedrigere EAS-Schadenrate auf als Masseendverschlüsse. Weiterhin sind Endverschlüsse leicht zugänglich. Durch den Ersatz einer kurzen Kabelstrecke kann also eine starke Absenkung des Schadensrisikos bei vergleichsweise niedrigen Investitionskosten erreicht werden.
Besondere Einflüsse, welche die altersbedingte Schadenrate eines Kabels erhöhen, beeinflussen nur unterproportional dessen Priorität.	Ein Großteil der Kabelschäden wird durch externe Einflüsse verursacht. Auf diesen Schadensanteil hat eine beschleunigte Alterung des Kabels keine Auswirkung.
Stark segmentierte Massekabel sind kritischer als stark segmentierte VPE-Kabel.	Die Schadensraten von VPE-Muffen sind um ca. eine Zehnerpotenz niedriger als die von Massekabel-Muffen.