

Neue Ansätze für die sichere Auslegung von Treibgasspeichern – Probabilistik und Risikoansatz

G. W. Mair
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
Fachgruppe III.2

Kurzfassung

Die Beurteilung neuer Techniken bezüglich der Gefährdung von Dritten wird immer weniger mit Hilfe traditioneller, auf Erfahrung und Iteration basierenden Betrachtungsweisen hinreichend möglich. Deshalb werden zunehmend probabilistische Analysen und Risikobetrachtungen erforderlich. Diese Verfahren bieten zudem die Möglichkeiten, ein System z. B. gegenüber Eigengewicht oder Wartungsaufwand bei gleicher oder auch besserer Sicherheit zu optimieren.

Vor diesem Hintergrund werden zunächst die Begriffe „Risiko“ und „Chance“ bzw. „Gefahr“ und „Sicherheit“ erläutert. Am Beispiel von Treibgasspeichern – wie sie auch für die Speicherung von Wasserstoff in Fahrzeugen eingesetzt werden – wird gezeigt, dass die bisherige, deterministische Betrachtungsweise von Druckbehältern und deren „statische Sicherheit“ (z. B. gegen Bersten) kein hinreichendes Maß der „Sicherheit“ als Gegenteil von „Gefahr“ darstellt oder sogar irreführend für die richtige Einschätzung ist.

Einführung

Der Einsatz von Gas als Treibstoff in Kraftfahrzeugen – sei es Flüssiggas, Erdgas oder Wasserstoff – wird immer von einer intensiven Diskussion über mögliche Gefahren begleitet. Das subjektive Gefühl der Beklemmung, das potentielle Autokäufer manchmal vor dem Umstieg auf ein Treibgasfahrzeug, heute überwiegend Erdgas (CNG), abschreckt, ist meist diffus, unbestimmt und kaum greifbar. Die Furcht vor dem „worst case“, dem Bersten von Gasflaschen, wird in der Presse teilweise mit der Angst vor radioaktiver Strahlung verglichen, für die der Mensch ebenfalls keinen Sinn zur Wahrnehmung hat. Es gibt in beiden Fällen keine Alltagserfahrungen, die es der menschlichen Psyche erlauben, die Gefahr einer Technik gegen den persönlichen oder gesellschaftlichen Vorteil durch diese Technik konkret abzuwägen.

Daraus resultiert eine oft von Vorurteilen geprägte Diskussion, die Risiken aus Erdgas und Wasserstoff mit denen von Benzin- oder Dieselfahrzeugen vergleicht. Aufgrund der großen Unterschiede bezüglich der Stoffeigenschaften und insbesondere der Speichermethoden ist ein direkter Vergleich jedoch kaum möglich. So ist zum Beispiel die Dichte von Flüssigwasserstoff selbst am Siedepunkt bei -253°C mit $70,8\text{ kg/m}^3$ nur ungefähr 1/10 der Dichte von Benzin und ist signifikant für die Unterschiede der Systeme.

Auch lässt sich die Lachenbildung von aus dünnwandigen Kraftstofftanks ausgelaufenem Benzin nicht mit dem Verhalten eines leckenden oder gar berstenden Treibgasspeichers vergleichen.

Vor diesem Hintergrund beginnen beide Seiten der Risikobetrachtung, die probabilistische (wahrscheinlichkeits-

orientierte) Betrachtung von Versagensabläufen auf der einen Seite und die Unfallstatistik/Wartungsstatistik mit dem Zusatzaspekt der Konsequenz auf der anderen Seite, an Attraktivität zu gewinnen. Mit diesen Formen der Betrachtung, die wegen ihres unterschiedlichen Herangehens noch zu selten kombiniert werden, wird es möglich, auch im Sinne einer Technikfolgenabschätzung, Schutz- und Wirkungsziele zu beschreiben, die sicherstellen, dass die Gefährdung eines Kraftfahrers oder eines unbeteiligten Dritten durch die Treibgastechnik keinesfalls größer ist als die durch konventionelle Treibstoffe.

Erfahrungsgemäß haben die sehr seltenen nennenswerten Zwischenfälle große Auswirkungen und werden damit in der Öffentlichkeit nachhaltig wahrgenommen.

Der Risikobegriff

Die Basis für den Risikobegriff bildet die Suche nach der Einschätzung von Gefahren und deren Abwägung mit der Chance, die sich aus dem Eingehen eines „Wagnisses“ ergibt. So wird im Zusammenhang mit der Risikodiskussion von einem Zustand der Gefahr gesprochen, wenn das Risiko einen bestimmten Wert, das Grenzkrisiko, übersteigt. Im Umkehrschluss spricht man von Sicherheit, wenn dieses Risiko kleiner als das Grenzkrisiko ist. Das Grenzkrisiko kann vom Gesetzgeber vorgegeben werden, ist aber meist die parallel zu einer technischen Entwicklung herausgebildete allgemeine Akzeptanz eines sich historisch entwickelten Risikos. Mit der zunehmenden Geschwindigkeit neuer technischer Entwicklungen versagen häufig die traditionellen, langsam wirkenden Regulierungsprozeduren. Oft können aufgrund der zunehmenden Internationalisierung und damit verbundenen Harmonisierung die nationalen Aspekte (von der Bevölkerungsdichte bis hin zum Niveau des allgemeinen Technikverständnisses) in den Zulassungsprozeduren nicht mehr differenziert berücksichtigt werden.

Der Begriff des statistischen Risikos R lässt sich auch mathematisch als Verknüpfung beschreiben:

$$R \equiv \hat{H} \bullet K \quad \text{Gl. 1}$$

Hierbei stehen \hat{H} für statistische Häufigkeit eines im Betrieb (unerwünschten) Ereignisses und K für die statistische Konsequenz aus diesem Ereignis.

Nähert man sich aus Sicht der Bauteilprobabilistik dem gleichen Ziel, ist mit der Anzahl der Systeme N , der Versagenswahrscheinlichkeit V auf der Basis der Häufigkeitsverteilung H_V und der Konsequenz, die einer Häufigkeitsverteilung H_K unterliegt, zu arbeiten.

$$V(x) = \int_{-\infty}^x H_V(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \dots) dx \quad \text{Gl. 2}$$

$$K(y) = \int_{-\infty}^y H_K(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, \dots) dy \quad \text{Gl. 3}$$

Damit ist das Risiko R bereits im Vorfeld von statistischen Erhebungen aus dem Betrieb als Verknüpfung zweier unab-

hängiger, mehrdimensionaler Funktionen für ein technisches System theoretisch beschreibbar und ansatzweise prognostizierbar:

$$R(x, y) = N_{\text{Systeme}} \cdot [V(x) \cdot K(y)]_{\text{System}} \approx \hat{H} \cdot K \quad \text{Gl. 4}$$

Diese Gleichungen sind zu interpretieren im Wissen darum, dass

1. die Konsequenz K einen Sach- und/oder Gesundheitsschaden darstellt,
2. die Reduktion eines Risikos R , ob dies nun über Wahrscheinlichkeit oder Konsequenz erfolgt, in der Regel mit einem monetären Aufwand verbunden ist,
3. ein Verbot von Schäden an Gesundheit und Leben de facto einem generellen Technikverbot gleichkäme,
4. die Abwägung von Risikofolgen gegen Reduktionsaufwand somit letztendlich die monetäre Betrachtung auch von Gesundheit und Leben darstellt.

Daraus entsteht für die Politik die schwierige Aufgabe, Grenzkrisen nach ethischer Bewertung volkswirtschaftlich zu optimieren. Vergleiche mit Risiken anderer Technikfelder können Hilfestellungen liefern.

Risiko und Systemzuverlässigkeit

Die technische Analyse von Systemzuverlässigkeiten und die Konsequenzaussagen, die von den verschiedensten Versagensszenarien eines Systems abhängen, können nur über weitergehende Betrachtungen zu den oben genannten Gleichungen erarbeitet werden.

Die Konsequenzbetrachtung nach Gl. 3 basiert auf verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Gesamtheit der die Konsequenz K beeinflussenden Zusammenhänge und für alle denkbaren Konsequenzarten, wie mechanische Kräfte aus dem Versagen, stoffliche Eigenschaften, geographischen Faktoren, Bevölkerungsdichte, Wetter etc..

Die Versagenswahrscheinlichkeit V (mit der Systemzuverlässigkeit Z als Komplement) nach Gl. 2 hängt von der Dimensionierung des technischen Systems und den Einsatzbedingungen inklusive Wartung etc. ab.

Die Risikoformel kann näherungsweise technisch ausgewertet werden, wenn für jedes diskrete Ereignis „ j “ (z. B. j = Bersten eines Speichers bei N Speichern im Verkehr) aus der Summe „ J “ aller möglichen Ereignisse die jeweilige (mittlere) Konsequenz K_j ermittelt und mit der Versagenswahrscheinlichkeit V_j des jeweiligen Ereignisses „ j “ verknüpft wird; z. B.:

$$R_{j=\text{Bersten}} = N_{\text{Speicher}} \cdot (V_{j=\text{Bersten}} \cdot K_{j=\text{Bersten}}) \quad \text{Gl. 5}$$

Das Risiko R ist dann vereinfacht die Summe der Einzelereignisse:

$$R = N \sum_{j=1}^J R_j = N \sum_{j=1}^J V_j \cdot K_j \quad \text{Gl. 6}$$

Eine anwendbare Einheit für das Risiko ist hierbei „EUR pro Jahr“ zu nennen. Als erwirtschaftbares Geld pro Zeit kann in diesem volkswirtschaftlichen Zusammenhang auch das Komplementär zum „Risiko“, die „Chance“, gewertet werden.

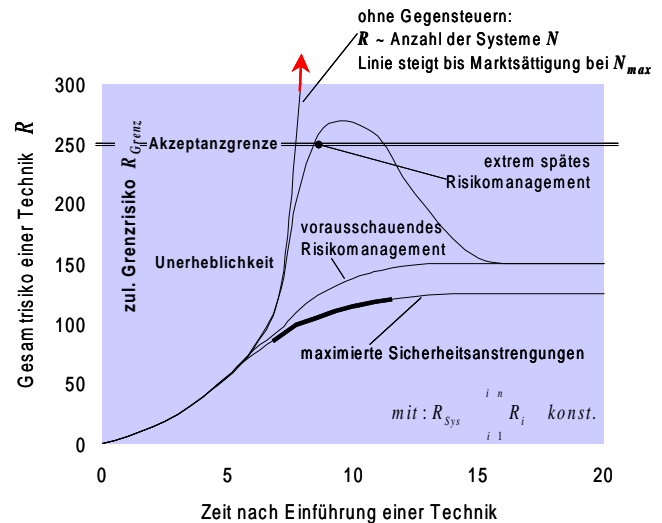


Abb. 1
Prinzipdarstellung zu Ansatz und Auswirkung von Risikomanagement

Als Beispiel für die Betrachtung einer Systemzuverlässigkeit und zur Darstellung verschiedener Herangehensweisen zur Risikosteuerung sei das Beispiel des Treibgasspeichers im Kraftfahrzeug verwendet.

Das zu betrachtende Risiko für ein im Betrieb befindliches System setzt sich aus verschiedenen Einzelrisiken zusammen. In diesem Beispiel können dies sein: Leckage durch Linierermüdung, Bersten durch Überdruck beim Betanken, Gasaustritt durch Fehlauslösung einer Druckentlastungseinrichtung, Wasserstofffreisetzung durch Unterfeuerung nach Zusammenstoß mit einem Benzinfahrzeug, das Feuer fängt, etc. Die Höhe des Risikos aller im Einsatz befindlicher Systeme ist dann nach Gl. 6 proportional zur Anzahl der Systeme im Betrieb N .

Wie in Abb. 1 dargestellt ist, spielt der Zeitpunkt des Einsatzes der risikosteuernden Maßnahme (Stichwort: Risikomanagement) eine wesentliche Rolle für den Erfolg der steuernden Maßnahmen bei der Einführung einer neuen Technik.

- Erfolgen keine gegensteuernden Maßnahmen bei über die Akzeptanzgrenze hinausgehenden Risiken, bricht der Markt für ein Produkt weg. Diese Selbstregulierung geschieht jedoch oft zu spät und meist in einer weder sozial noch volkswirtschaftlich vertretbaren Form.
- Erfolgen die notwendigen Maßnahmen zu spät, kann ein Überschwingen mit zumindest temporär unakzeptablen Risiken nicht verhindert werden. Die Akzeptanz für ein Produkt wird nachhaltig negativ beeinflusst.

Beide Szenarien sollen auch im Hinblick auf die Treibgas-technik, Erdgas und Wasserstoff, vermieden werden. Es liegt im Interesse aller an der Treibgastechnik beteiligten Stellen, ob Behörde, Kraftfahrzeughersteller oder Gasversorger, die Akzeptanz so hoch wie möglich zu halten bzw. zu bringen. Aus diesem Grund sind weitere zwei Szenarien prioritär zu bedenken:

- Die Sicherheitsanstrengungen werden maximiert. Damit verbunden sind jedoch wirtschaftliche Hürden für die Technik, die über sehr teure Endprodukte und hohe Betriebsauflagen die Akzeptanz aus wirtschaftlicher Sicht meist konterkarieren.

- Im Idealfall führt der frühzeitige und vorausschauende Einsatz von risikosteuernden Maßnahmen zu einem kontrollierten Annähern an die sogenannte Unerheblichkeitsgrenze, die sich unterhalb der eigentlich durchsetzbaren Akzeptanzgrenze befindet. In diesem Bereich fällt die Technologie, wie z. B. des Wasserstofffahrzeuges nicht nachhaltig negativ auf, so dass Sicherheitsfragen nicht als der Attraktivität abträglich zum Tragen kommen.

Somit bleibt zu fragen, was im Interesse aller getan werden kann, um die mit relativ hoher Konsequenz verbundenen Gasspeichersysteme als Kernpunkte der Sicherheit des Treibgasfahrzeuges im Sinne des vorausschauenden Risikomanagements sofort und nachhaltig zu steuern.

Ressourcenschonung durch Systembetrachtung

Quantitative Risikoansätze und probabilistische Systembetrachtungen können auch helfen, durch eine gezielte Anpassung der Lösung an die Anforderungen, den Aufwand optimal einzusetzen. Erläuternd sei in *Abb. 2* skizzenhaft auf den Lernprozess eingegangen, den Bau eines Turmes aus Quadern (Bausteinen) zu optimieren.

1. Dimensionierung der Einzelelemente nach deterministischen Gesichtspunkten:
Jede Komponente wird für sich mit den gleichen Sicherheiten ausgelegt und in mehr oder weniger zufälliger Reihenfolge ohne Beachtung der Wechselwirkung mit anderen Bauteilen in das System eingefügt.
D. h.: Die Bausteine werden ohne weitere erfahrungsbasierte Automatismen zu einem Turm in der Reihenfolge gestapelt, in der diese wahrgenommen werden und damit subjektiv zur Verfügung stehen.
2. Dimensionierung der Elemente nach deterministischen Gesichtspunkten als System:
Jede Komponente wird zwar immer noch für sich mit den gleichen Sicherheiten ausgelegt und in mehr oder weniger zufälliger Reihenfolge in das System eingefügt, aber die Positionierung im System erfolgt unter Beachtung grundlegender Wechselwirkungen.
D. h.: Die Bausteine werden nach wie vor in willkürlicher Reihenfolge gestapelt, aber die Lehren der ersten Erfahrungen werden umgesetzt, nach denen Quader genau (mit ihren Schwerpunkten) übereinander liegen müssen, damit der Turm stabil steht.
3. Ressourcenschonung durch Probabilistische Optimierung von Elementen und dem gesamten System:
Die Komponenten werden nicht mehr für sich mit den gleichen Sicherheiten ausgelegt. Sie werden nach ihrer

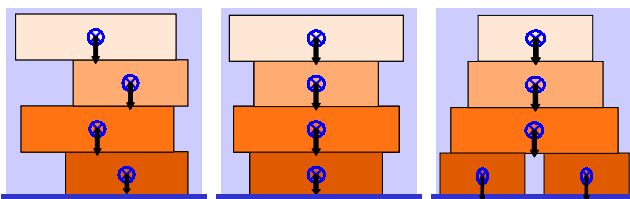


Abb. 2
Optimale Ressourcenverwendung am Beispiel eines Turms aus Bausteinen

Bedeutung für die Gesamtzuverlässigkeit dimensioniert und an der Stelle ins System eingefügt, an der sie sich mit ihren Eigenschaften unter Beachtung der Wechselwirkungen am sichersten einfügen lassen.

D. h.: Die Bausteine werden als verfügbare Ressourcen systematisch erfasst. Gleichzeitig wird darauf geachtet, dass sie der Größe der Standfläche nach sortiert zu einem Turm gestapelt werden. Darüber hinaus werden die Schwerpunkte übereinander gestapelt.

Damit ist skizziert, wie nicht nur ein Turm aus Quadern möglichst hoch gebaut werden kann, sondern auch veranschaulicht, wie die „probabilistische Betrachtung“ als Beitrag zur Ressourcenschonung wirken kann.

Ein Beispiel für die probabilistische Optimierung

Die Bedeutung der probabilistische Betrachtung soll nun neben den Aspekten der Risikosteuerung durch eine schutzzielformulierte Optimierung und der Ressourcenschonung um einen weiteren Aspekt erweitert werden: Rein deterministische Betrachtungen können insbesondere bei ausschnittsweise Analyse auch in die Irre führen. Die Hypothese hierzu lautet, dass ein klassischer Sicherheitsbeiwert bei Übertragung auf neue, insbesondere statisch unbestimmte Systeme seine Maßgabe für die Sicherheit im Sinne eines Risikoschutzzieles verlieren kann.

Die probabilistische Optimierung basiert auf einem möglichst detaillierten Modell der Versagensabläufe, wie in [1] am Beispiel umfangsumwickelter Gasflaschen ausgeführt. Hierbei sind insbesondere primäre und sekundäre Ereignisse, die gegebenenfalls unterschiedliche Ursachen haben auf den verschiedenen Versagenspfaden, sauber zu trennen und in ihrer Wechselwirkung zu betrachten. Wie in *Abb. 3* dargestellt, wird ein solches Modell selbst für einfache Bauteile schnell komplex und ist ohne umfassende Beschreibung (siehe dazu [1]) kaum umfassend interpretierbar. Das angestrebte Ziel, das dem beispielhaften Ablaufdiagramm zugrunde liegt, ist die Ausfallsicherheit durch partielle Redundanz (Fail-Safe-Design), in Form einer primär zu erwartenden innendruckentlastenden Leckage bei hoher Zuverlässigkeit gegen Bersten.

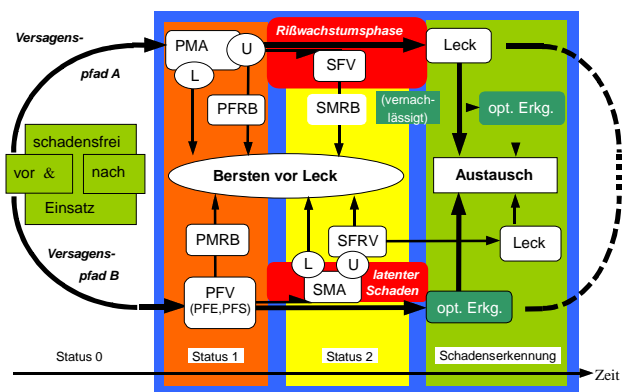


Abb. 3
Zweistufigkeit der Versagensabläufe von umfangsverstärkten Composite-Flaschen [1]: Verwendete Abkürzungen: P = primär, S = sekundär, R = Rest; M = Metall, F = Faser; A = Anriss, B = Bruch, V = weitere Versagensformen; L = längs, U = Umfang

Als Beispiel wird ein Typ II-Speicher aus Stahl mit Carbonfaser für den Einsatz auf dem Dach eines einstöckigen Nahverkehrsbusse gewählt. Die für den konkreten Einsatz ermittelte Belastung und festgelegte Lebensdauer der Behälter ist 5000 LW in 15 Jahren. Das Lastkollektiv wird nach [2] als Summenhäufigkeitsverteilung H_s über der relativen Belastungsamplitude x_a und in seiner Form durch den Exponenten 3 beschrieben. Mit dem natürlichen Logarithmus von $\ln(5000) \approx 8,52$ gilt:

$$H_s = 5000 \cdot \exp(-8,52 \cdot x_a^3). \quad \text{Gl. 7}$$

Als Schutzziel wird für das gewählte Beispiel zunächst die Obergrenze der Versagenswahrscheinlichkeit „Bersten“ unter den betrachteten Randbedingungen von $V_{\text{Bersten}} \leq 10^{-6}$ vorgegeben. Als zweitrangiges Schutzziel dient die Vorgabe, dass bis zum Ende der Lebensdauer höchstens 1 % aller Treibgasspeicher undicht werden dürfen ($V_{\text{Anriss}} \leq 10^{-2}$).

Wertet man die Ergebnisse aus [1], die alle diese Anforderungen – allerdings für leicht variierende Randbedingungen (Parameter: Impact-Einfluss) erfüllen – nach dem sich ergebenden statischen Sicherheitsbeiwert und dem für die Konstruktion erforderlichen Gewicht aus, kommt man zu einem auf den ersten Blick eindeutigen aber irreführenden Ergebnis, das in Abb. 4 dargestellt ist.

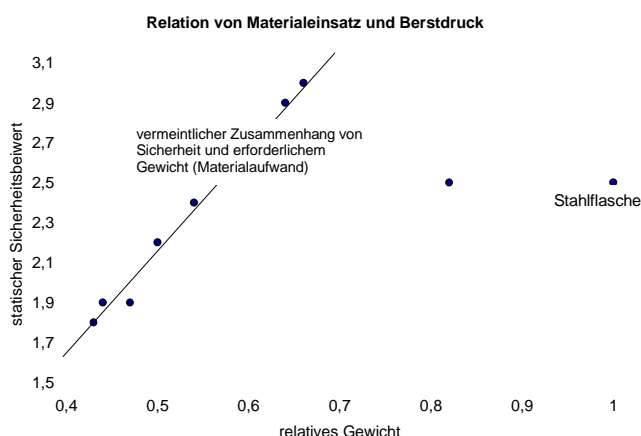


Abb. 4 Wechselwirkung von Gewicht und Sicherheitsbeiwert für umfangsumwickelte Stahlzylinder; Alle ausgewerteten Optimierungsergebnisse aus [1] erfüllen die Anforderung von $V_{\text{Bersten}} \leq 10^{-6}$ und $V_{\text{Anriss}} \leq 10^{-2}$

Obwohl alle Optimierungsergebnisse die Schutzziele in Form von Restriktionen erfüllen, weisen die verschiedenen Optimierungsergebnisse sehr unterschiedliche statische Sicherheitsbeiwerte auf.

Die in der linken Bildhälfte liegenden, relativ leichtgewichtigen Hybridzylinder geben einen vermeintlich systematischen Zusammenhang zwischen Sicherheitsbeiwert und Gewicht (bezogen auf den Referenzstahlkörper) wieder. Vergegenwärtigt man sich jedoch die Bedeutung des statischen Sicherheitsbeiwertes im Kontext mit dem Zustand der Sicherheit im Sinne der Risikobetrachtung ist festzustellen, dass alle Punkte im Diagramm für das gleiche Risiko stehen. Jeder Punkt stellt ein Optimierungsergebnis mit der Berstwahrscheinlichkeit von $1 \cdot 10^{-6}$ dar und erfüllt somit das

gleiche risikobasierte Schutzziel mit nur leichten Variationen der Betriebsbedingungen. Da den Optimierungsergebnissen gleicher Gasdruck und gleiches Volumen zugrunde liegt, darf man eine vergleichbare Konsequenz im Fall des Berstens annehmen. Damit geben alle Punkte das gleiche akzeptable Risiko und ergo die gleiche Sicherheit wieder. Der erste Eindruck eines Zusammenhanges zwischen Sicherheit und Gewicht ist in diesem Kontext somit als irreführend belegt.

Somit ist gezeigt, dass statische Sicherheitsbeiwerte selbst bei relativ einfachen statisch unbestimmten Bauteilen wie Composite-Gasflaschen weder ein qualitativ noch quantitativ geeignetes Maß für die Sicherheit sind.

Zusammenfassung

Es kann somit resümiert werden, dass,

- für die fundierte Bewertung und die Gewährleistung der Akzeptanz von Treibgasfahrzeugen die Entwicklung neuer Verfahren erforderlich ist,
 - die deterministischen Schutzzielvorgaben und Auslegungsverfahren nur begrenzt das Geforderte leisten können,
 - das quantitative Risikomanagement unter Einbeziehung der probabilistischen Optimierung ein probates, gegebenenfalls sogar das einzig sinnvolle Mittel hierfür ist,
 - die probabilistische Systemoptimierung neue Möglichkeiten für die Wirtschaftlichkeit und die Schutzzielformulierung bzw. die öffentlich technische Sicherheit allgemein bietet.
- Damit bleibt als Aufgabe zur Gewährleistung der sicheren Umschließung von Treibgas und auch der Akzeptanz der gesamten Fahrzeuge die Entwicklung von anwendbaren Werkzeugen zur quantitativen Risikoanalyse,
- die helfen, technische Maßnahmen und Umgangsvorschriften an der Stelle höchster Effizienz einzusetzen,
 - die es erlauben, die Verbreitung einer Technik und deren Einsatzort in die Sicherheitsanalyse mit einzubeziehen,
 - um so die Akzeptanz von neuen Techniken wie Erdgas und Wasserstoff im Kraftfahrzeug möglichst hoch zu halten.

Literatur

- [1] Mair, G. W.: Zuverlässigkeitsrestringierte Optimierung faserteil- armierter Hybridbehälter unter Betriebslast am Beispiel eines CrMo4-Stahlbehälters mit Carbonfaserarmierung als Erdgasspeichers im Nahverkehrsbus, Düsseldorf: VDI-Verlag, Fortschr.-Ber., R. 18, Nr. 186, D83 (1996)
- [2] Mair, G. W.: Das Low-Cycle-Ermüdungsverhalten von Faser-Metall-Hybridstrukturen am Beispiel eines carbonfaserarmierten Druckgasspeichers im Nahverkehrsbus, Düsseldorf: VDI-Verlag Fortschr.-Ber., R. 18, Nr. 178 (1995)