

9. Karlsruher Fahrzeugklima-Symposium

Leitungen und Verbindungselemente von Kfz-Klimaanlagen

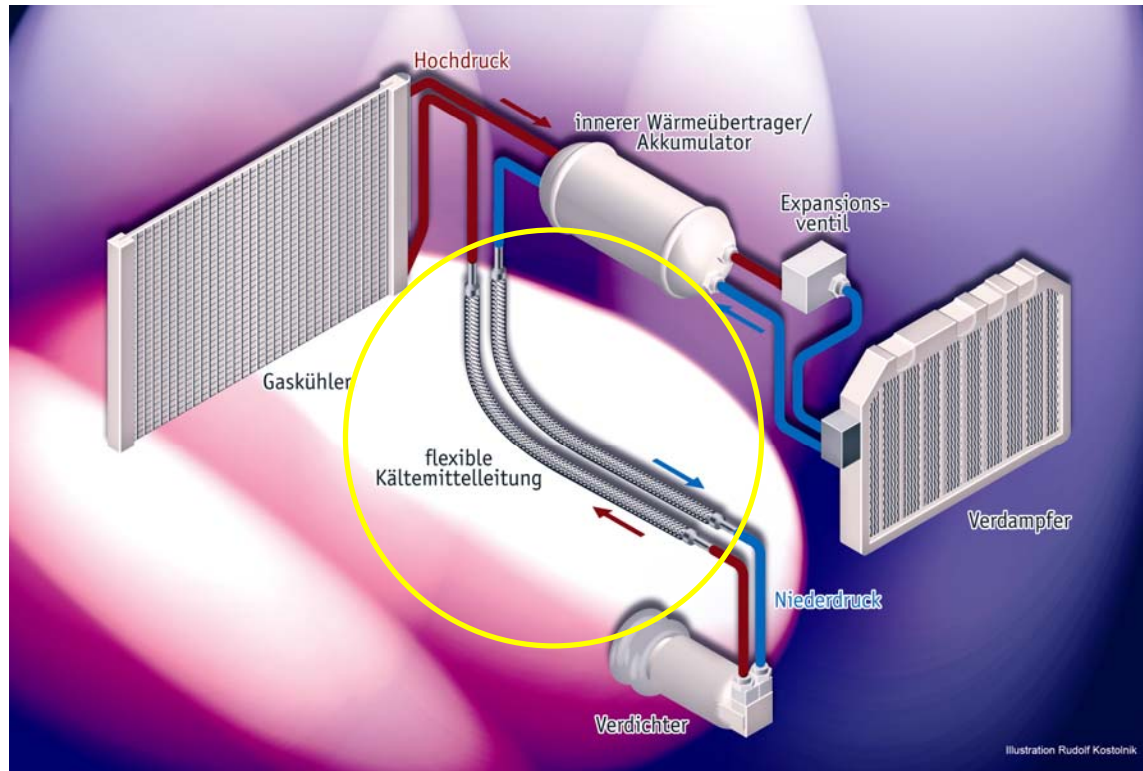
Metallschläuche als permeations- dichte Sperrschicht für Kältemittel-Leitungen in PKW

Dr. Carlo Burkhardt,
Witzenmann GmbH

Karlsruhe, 21.09.06

Einleitung

- Um die Bewegungen zwischen den motorfesten und chassisfesten Komponenten einer Klimaanlage zu entkoppeln, werden flexible Verbindungsleitungen eingesetzt



Anforderungen

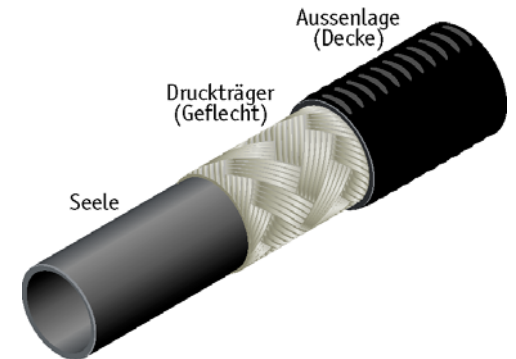
In konventionellen Klimaanlage mit dem Kältemittel R134a werden bisher Elastomerschläuche eingesetzt, die typischerweise aus einer Innenlage (Seele), einem Druckträger (Geflecht) und einer Außenlage (Decke) bestehen.

Problem:

- Die Permeabilität von Elastomerwerkstoffen gegenüber CO₂ ist deutlich höher als gegenüber dem Kältemittel R134a.
- Die Betriebstemperaturen liegen mit bis zu 180°C am Austritt des Kompressors deutlich höher als bei R134a (max. 100°C).

Elastomere besitzen aufgrund ihrer Struktur eine gewisse Gasdurchlässigkeit. Konventionelle Klimaschläuche sind so aufgebaut, daß das Seelenmaterial eine Sperrfunktion für das Kältemittel bzw. das Kältemaschinenöl besitzt. Trotzdem kommt es auch bei R134a zu einer gewissen Permeation, die aber am Markt akzeptiert wird.

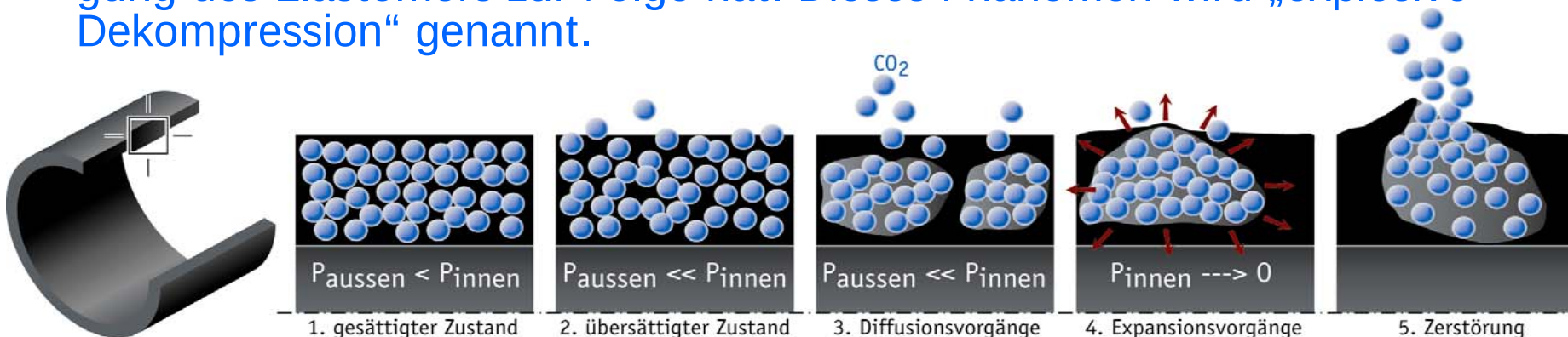
Der Kältemittelverlust wird durch regelmäßiges Auffüllen der Klimaanlage im Rahmen von Serviceintervallen ausgeglichen.



Anforderungen

Bei einem Betrieb der Klimaanlage mit CO₂ ist das Problem der Permeation aber weitaus kritischer zu betrachten:

- CO₂ besitzt eine hohe Affinität zur Oberfläche von Elastomerwerkstoffen, was zu einer hohen Löslichkeit von CO₂ in Elastomeren führt.
- Der Elastomerschlauch wird entsprechend dem anliegenden Innendruck bis zur Sättigungsgrenze mit Gas beladen. Bei schnellem Druckabfall entsteht ein Druckgefälle zwischen Elastomer und Umgebung, den das Material durch Diffusion in Richtung Schlauchoberfläche auszugleichen versucht. Das diffundierende Gas sammelt sich in existierenden oder neu entstehenden Hohlräumen, was zur Bildung von Blasen führt. Bei starker Expansion platzen diese Blasen, was eine strukturelle Schädigung des Elastomers zur Folge hat. Dieses Phänomen wird „explosive Dekompression“ genannt.



Anforderungen

Leckage-Szenario

Bei durchschnittlicher Füllmenge und Leckage-Rate^{*)} ergibt sich für R134a-Anlagen eine durchschnittliche Betriebsdauer von etwa 6 Jahren^{**)}.

Bei gleicher Betriebsdauer bedeutet das für R744 auf die einzelnen Komponenten heruntergebrochen, dass die Gesamtheit aller Verbindungsstellen und flexiblen Leitungen ca. 10g/a CO₂ verlieren darf.^{**)}

Verbindungsstellen (mehr als 10?...): jeweils $\leq 1\text{g/a}$

flexible Leitungen (ungefähr 2-4...): jeweils $\leq 1\text{g/a}$

Absolute Permeationsdichtigkeit und Leckagefreiheit sind erforderlich!

^{*)} *Establishing the Leakage Rates of Mobile Airconditioners [Schwarz,Hanisch, 2003]*

^{**)} *Fluid Transport Components for CO2 [Froehling, 2003]*

Anforderungen

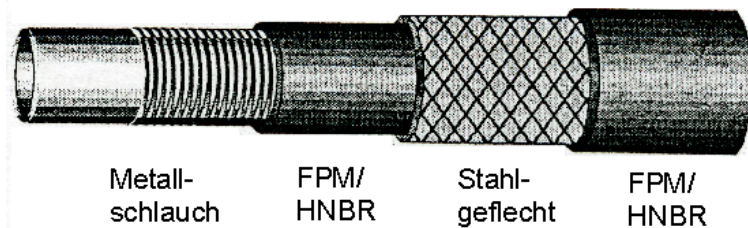
Die weiteren Anforderungen an flexible Verrohrungen von CO₂-Klimaanlagen für PKW lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- gute Entkopplung von Motorbewegungen und Schlechtweganregungen
- schwingungsbeständig über Lebensdauer
- druckpulsationsfest über Lebensdauer
- geeignet für Betriebsdrücke bis 140 bar
- Berstdruck mit entsprechender Sicherheit auf den Betriebsdruck
- geeignet für Temperaturen zwischen -40°C und 180°C
- kostengünstig

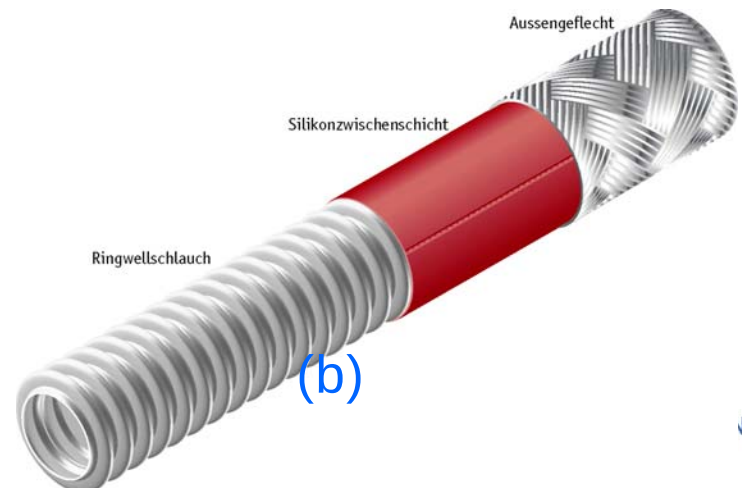
Aufbau & Funktion

Insbesondere die Vermeidung von CO₂-Permeation und explosiver Dekompression verlangen einen völlig anderen Aufbau des Schlauches im Vergleich zu einem konventionellen Elastomerschlauch für Anlagen die mit R134a als Kältemittel betrieben werden. Auch die hohen Einsatztemperaturen von bis zu 180°C sind als kritisch zu betrachten.

Die meisten der derzeit verfügbaren flexiblen Leitungen basieren deshalb auf einem Metallschlauch, der als permeationsdichte Lage eingesetzt wird. Dieser Metallschlauch kann als Seele in einem mehrschichtigen Elastomerschlauch (a) oder in einem metallischen Aufbau mit oder ohne Kunststoffzwischen-schicht eingesetzt sein (b).



(a) Quelle: ContiTech



(b)

Aufbau & Funktion

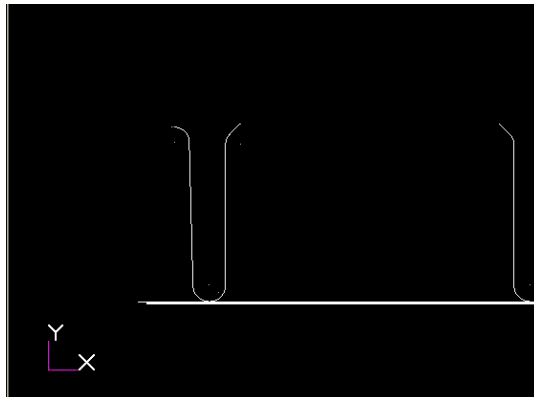
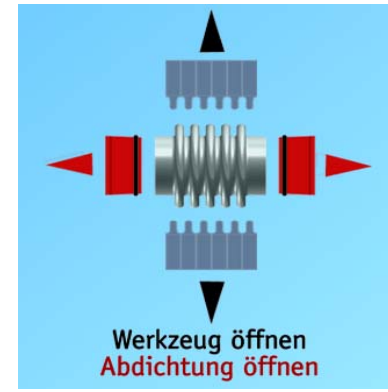
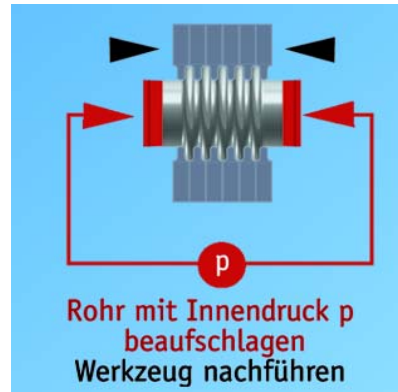
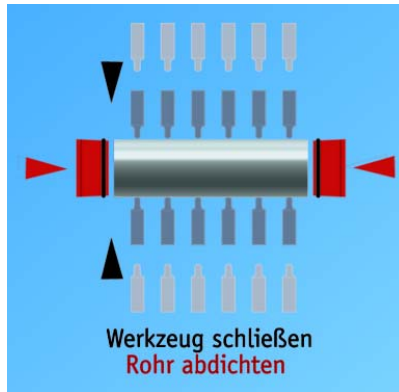
In beiden vorgestellten Ausführungsarten hat der Metallschlauch eine Schlüsselfunktion:

- er sichert eine **gasdichte Verbindung** zwischen karosseriefesten und motorfesten Komponenten
 - er entkoppelt die zwischen karosseriefesten und motorfesten Komponenten in der Klimaverrohrung auftretenden **Relativbewegungen**
- ➔ Er sichert die Lebensdauer des R744 Kältemittel-Leitungssystems und gewährleistet damit störungsfreien Betrieb der Klimaanlage über das Fahrzeugleben.

Herstellung von Metallschläuchen

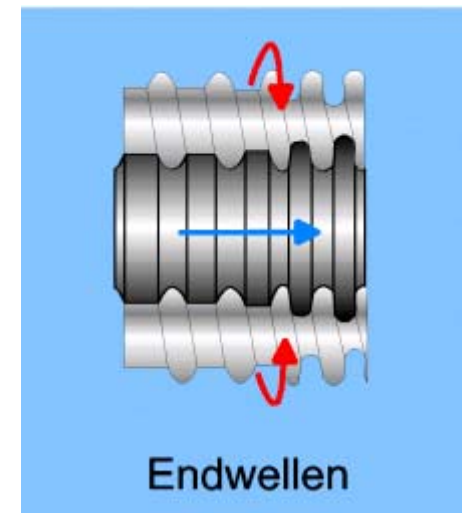
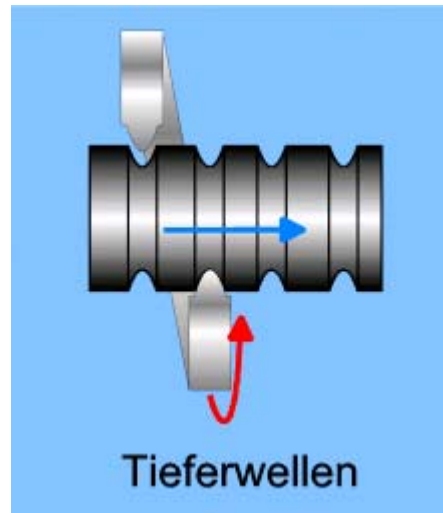
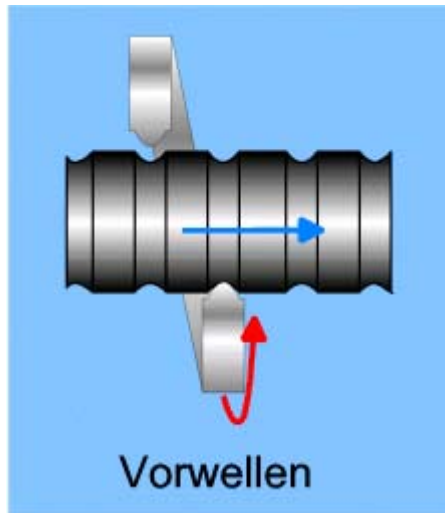
Aus einem kaltgewalzten Metallband wird ein Rohr geformt und längsnahtgeschweißt. Dieses Rohr wird zum Schlauch umgeformt:

1) hydraulische Umformung



Herstellung von Metallschläuchen

a) mechanische Umformung

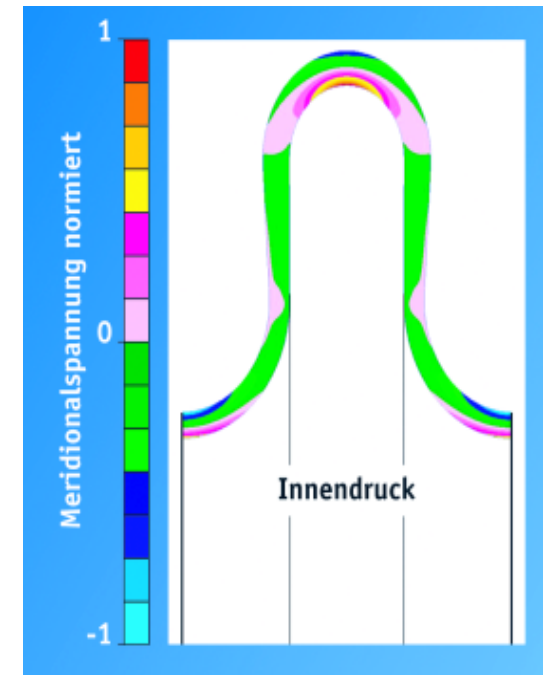


Schädigungsmechanismen

Bersten:

Der Metallschlauch muss mit entsprechender Sicherheit gegen Bersten ausgelegt werden.

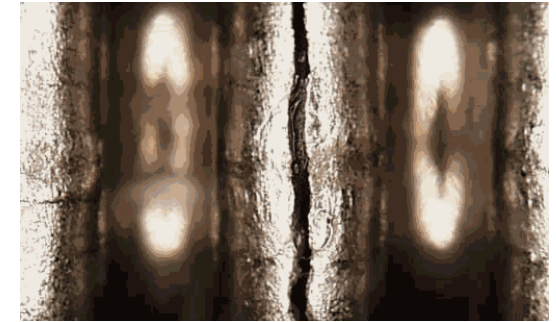
- Da die geforderten Berstdrücke im Rahmen der Spezifikationen bekannt sind und das Berstverhalten nicht zeitabhängig ist, kann nach heutigem Metallschlauchstandard ausgelegt werden
- Verbesserung der Druckfestigkeit durch Erhöhung der Wanddicke und/oder Verminderung der Wellenhöhe
- Die Validierung erfolgt nach einer standardisierten Berstdruckprüfung.



Schädigungsmechanismen

Ermüdung:

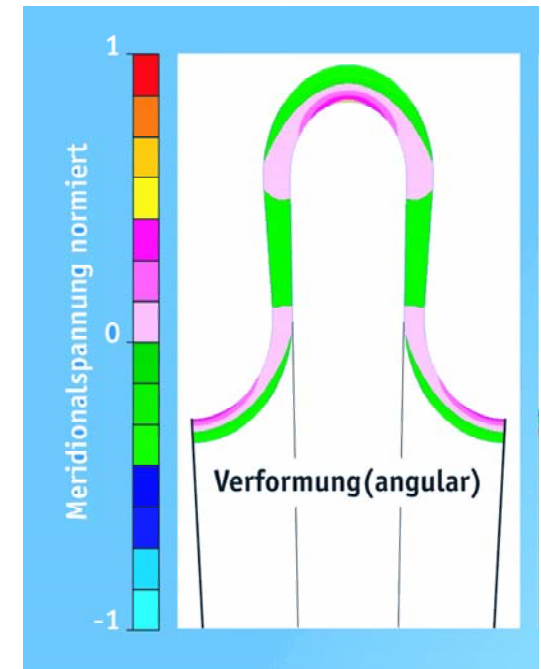
Der flexible Kältemittelschlauch muss eine entsprechende Sicherheit gegen Materialermüdung aufweisen.



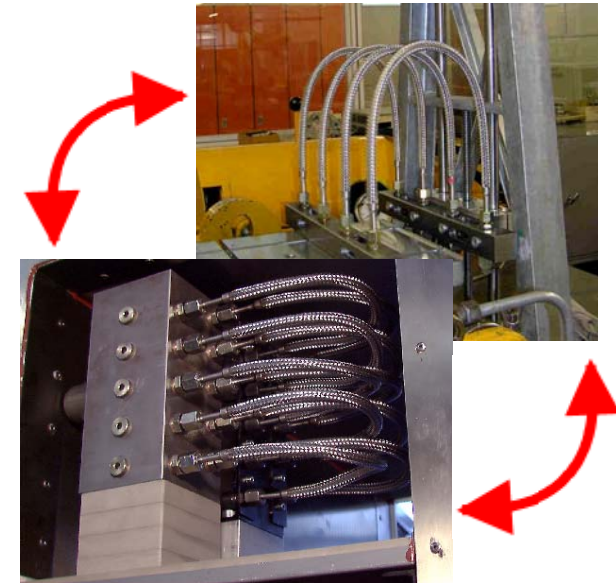
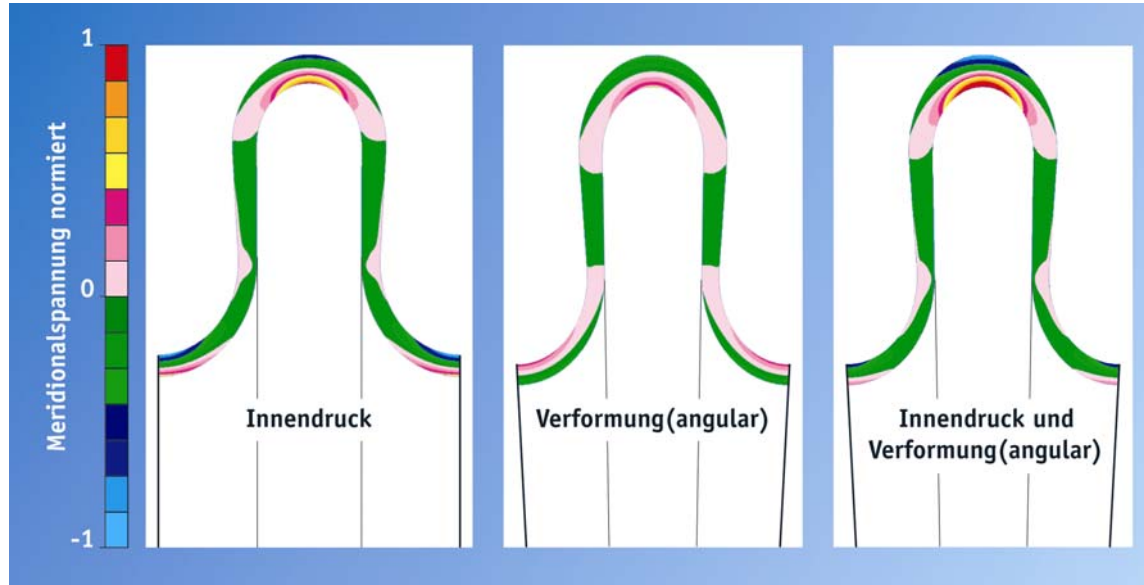
Hauptursachen für Materialermüdung:

- Spannungen durch Druckbelastung (statisch und pulsierend)
- Spannungen durch Verformungen

Die bisherige Erfahrung zeigt, dass Materialermüdung der **dominierende Schädigungsmechanismus** bei flexiblen Kältemittelschläuchen auf Metallschlauchbasis ist.



Schädigungsmechanismen

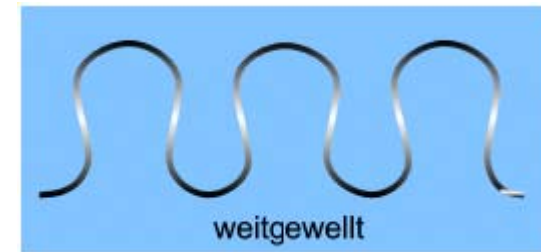
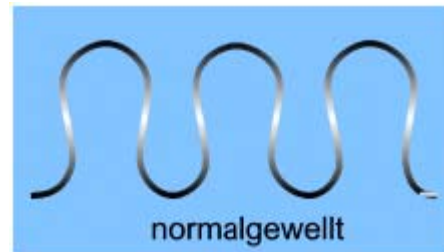
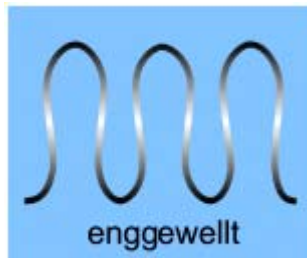


Eine Verbesserung der Druckfestigkeit von Metallschläuchen ist durch die Erhöhung der Wanddicke und/oder Verminderung der Wellenhöhe möglich.

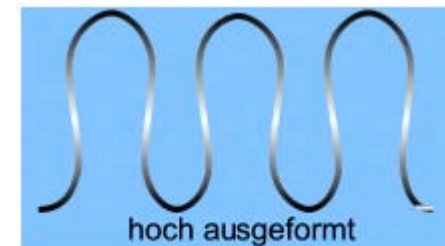
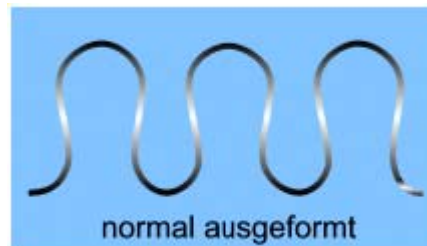
- Beide Maßnahmen verschlechtern aber die Ermüdungsfestigkeit gegen Verformungen
- Der Metallschlauch muß für diesen Zielkonflikt optimal ausgelegt werden

Variationsmöglichkeiten der Welschlauchgeometrie

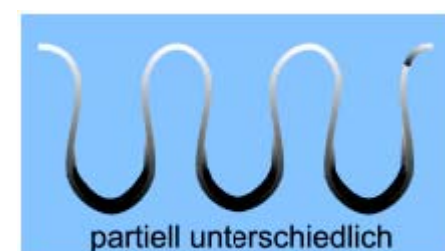
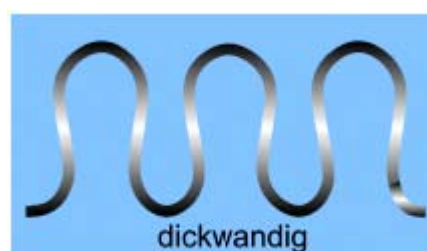
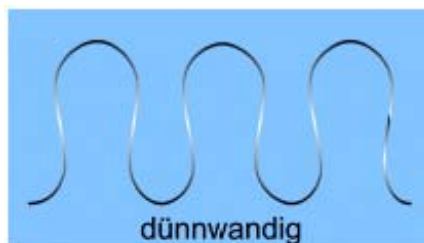
● Variation der Wellenlänge



● Variation der Wellenhöhe



● Variation der Wanddicke



Variationsmöglichkeiten Schlauchleitung

- Variation der Schlauchlänge (entspricht im Prinzip der Variation Wellenlänge, d.h. Unterbringung von möglichst vielen Wellen im flexiblen Bereich)



- Einbringung von partiell unterschiedlich gewellten Bereichen an mechanisch höher belasteten Stellen



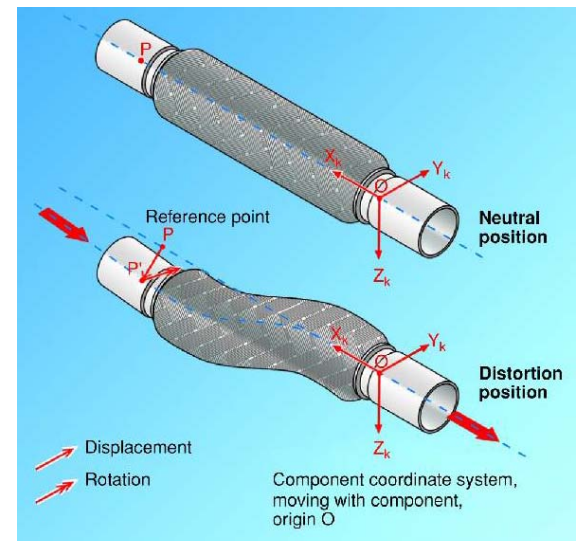
- Zusatzkomponenten zur örtlichen Senkung der schadigungsrelevanten Spannungen (Knickschutz etc.)

Auslegung Verformungen

Um Bauteilermüdung konstruktiv zu vermeiden, müssen die Betriebslasten bekannt sein, der die Leitungen **im Fahrbetrieb** (Anfahren, Gangwechsel, Bremsen sowie Schlechtweganregungen) ausgesetzt sind. Hierzu ist es notwendig, die tatsächlichen Verformungen der Leitung und damit des Metallschlauchs im Fahrzeug zu kennen.

Die auftretenden Verformungen sind mehrachsig und führen zu nicht-proportionalen Lasten in allen 6 Freiheitsgraden (DOF), d.h. drei Translationen in x, y und z-Achse und die drei dazugehörigen Rotationen. Die Verformungen sind **fahrzeugspezifisch**.

Deshalb benötigt man Meßeinrichtungen, um diese Verformungen im Fahrbetrieb zu messen. Mit diesen Eingangsdaten ist es möglich, auf einem Mehrachsprüfstand ein Fahrzeugleben zu simulieren.



Simulation Ermüdung

Fahrzeugmessung



Stewart-Plattform mit
Seilzugsensoren in Fahr-
zeug mit Quermotor (links)
bzw. Längsmotor (rechts)



Simulation des Fahrzeuglebens unter Innendruckbelastung



Visteon-Leitungssystem
mit Witzenmann-
Kältemittelleitung in
Vorserienvalidierung auf
servo-hydraulischem
Mehrachsprüfstand



Schädigungsmechanismen

Korrosion:

Es müssen geeignete Werkstoffe eingesetzt werden.

Verfügbare Werkstoffe sind austenitische rostfreie Stähle (Ti-stabilisiert und low-carbon) verschiedener Güte sowie Nickel-Basislegierungen.

Die Korrosionsanforderungen an Komponenten im Motorraum sind bekannt und entsprechende Korrosionsprüfungen sind spezifiziert (DIN 50 021).

Eine Validierung kann über entsprechende Korrosionsversuche erfolgen.



Zusammenfassung

- Um die Bewegungen zwischen den motorfesten und chassisfesten Komponenten der R744 Klimaanlage zu entkoppeln, werden zur Gewährleistung der Permeationsanforderungen derzeit flexible Verbindungsleitungen auf Metallschlauchbasis eingesetzt
- Die Schädigungsmechanismen an Metallschläuchen in R744 Leitungssystemen sind bekannt, Materialermüdung ist die dominierende Ausfallursache
- Es gibt einen Zielkonflikt zwischen der Auslegung gegen Ermüdung durch Innendruck und durch Verformung, der aber durch entsprechende Auslegung der Metallschlauchgeometrie minimiert werden kann
- Die Validierung der Ermüdungsfestigkeit sollte auf Komponentenebene durch einen Betriebslastennachfahrversuch abgebildet werden
- **WITZENMANN** steht mit Metallschläuchen als kompetenter Entwicklungspartner für R744-Kältemittelleitungen zur Verfügung

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr. Carlo Burkhardt

Leiter Produkt- und Verfahrensentwicklung

WITZENMANN GmbH, Pforzheim

Tel.: 07231 581680

carlo.burkhardt@witzenmann.com