Konstruktiver Entwurf S/00/06

Konstruktion und Inbetriebnahme einer Versucheinrichtung zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Rohren mit thermoplastischer Matrix

Alexander Kirsch
und
Jens Ritzert

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Maschinenbau
Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen
Prof.Dr.Ing. H. Schürmann

Kurzfassung

Am Fachgebiet **K**onstruktiver **L**eichtbau **u**nd **B**auweisen (KLuB) werden mehrere Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus **F**aser-**K**unststoff-**V**erbunden (FKV) mit thermoplastischer Matrix entwickelt.

Das Prinzip des **P**rofil-**A**rmierungs-**Z**iehen (PAZ) ermöglicht erstmals die kontinuierliche Produktion rohrförmiger FKV mit thermoplastischer Matrix. Ein mit Hybridfasern bewickeltes thermoplastisches Kernrohr wird an seiner Außenseite aufgeschmolzen und der flüssige Thermoplast durch eine Aufweitung des Kernrohres radial nach außen in die Wicklung gedrückt.
Versuche am Fachgebiet KLuB haben gezeigt, dass mit dem PAZ-Verfahren die angestrebte kontinuierliche Produktion möglich ist. Allerdings erreichen die hergestellten Rohre nicht die geforderte Qualität.

Zur Verbesserung der Qualität wird die konstruktive Umsetzung des Verfahrens in der bestehenden Versuchseinrichtung analysiert. Es ergeben sich mehrere Schwachpunkte, die im Rahmen einer Neukonstruktion zu beseitigen sind.
Für die Lösungsfindung bei der Neukonstruktion wird ein methodisches Vorgehen gewählt, bei dem die Gesamtfunktion des PAZ-Verfahrens in Teilfunktionen zerlegt wird und Einzellösungen für die Teilfunktionen zu möglichen Gesamtlösungen kombiniert werden. Anhand eines Bewertungsschemas wird die Optimallösung ermittelt.

Die gewählte Lösung umfaßt 5 Hauptfunktionsträger, die im Rahmen der Neukonstruktion einzeln betrachtet und zum eigentlichen Versuchsstand zusammengesetzt werden.

Nach Abschluß der Montage müssen die optimalen Verfahrensparameter in einer weiterführenden Arbeit geklärt werden.

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen I

1 Einleitung 1

2 Funktionsweise des Profil-Armierungs-Ziehens (PAZ) 3

2.1 Bisherige Umsetzung des PAZ-Verfahrens 5

2.2 Erzielte Ergebnisse 6

2.3 Schwachpunkte 6

3 Prinzipielle Neukonstruktion 10

3.1 Anforderungsliste 10

3.2 Methodik 12

3.3 Funktionsstruktur des PAZ-Verfahrens 13

3.4 Alternative Wirkprinzipien zur Umsetzung der Hauptfunktionen 14

3.5 Kombination der Teillösungen 18

3.6 Bewertung und Auswahl einer Gesamtlösung 23

3.7 Gliederung der Neukonstruktion 25

4 Neukonstruktion des Kolbens 26

4.1 Anforderungen 26

4.2 Festlegung der Außenkontur 27

4.3 Detailkonstruktion der inneren Struktur des Kolbens 32

4.4 Gesamtaufbau des Kolbens 36

4.5 Temperatureinstellung am Kolben 43

5 Neukonstruktion des Trägerrohres 44

5.1 Aufgaben und Anforderungen 44

5.2 Detailkonstruktion Trägerrohr 45

6 Neukonstruktion der Heizung 49
6.1 Auswahl des Heizverfahrens 49
6.2 Konstruktion der Heizungsaufnahme 53

7 Neukonstruktion der Abzugsvorrichtung 60
7.1 Krafterzeugung 60
7.2 Kraftleitung 60
7.3 Stützen des Versuchsrohres 68

8 Neukonstruktion der Wickelvorrichtung 70
8.1 Grundlagen 70
8.2 Detaillierte Umsetzung 70

9 Gesamtaufbau und Versuchsablauf 73

10 Zusammenfassung und Ausblick 76

11 Anhang 78
11.1 Technische Daten 78
11.2 Rechnungen 80
11.3 Montageanleitung 105
11.4 Versuchsdurchführung 112
11.5 Versuchsberichte 115
11.6 Sonstiges 123
11.7 Stückliste und sonstige Aufstellungen 132
11.8 Zeichnungen 137

Literaturverzeichnis

Bezeichnungen

Abkürzungen:

FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
Gf	Glasfaser
Hf	Hybridfaser
MSV	Mehrschichtverbund
PA	Polyamid
PA_6	Polyamid 6
PA_{12}	Polyamid 12
PAZ	Profil-Armierungs-Ziehverfahren

Symbole:

A	mm^2	Fläche
d	mm	Durchmesser
E	$\frac{N}{mm^2}$	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
G	$\frac{N}{mm^2}$	Schubmodul
l	mm	Länge
N	N	Normalkraft
n	$\frac{N}{mm}$	Normalfluß
p	$\frac{N}{mm^2}$,bar	Druck
$\dot{q}$	$\frac{W}{m^2}$	Wärmestrom
R	N	Reibkraft
R_m	$\frac{N}{mm^2}$	Zugfestigkeit
r	mm	Radius
r_{Komp}	mm	Kompaktierungsradius
t	mm	Wand-, Schichtdicke
t_1	mm	Dicke des kompaktierten Anteils des AWV vor der Kompaktierung
t_2	mm	Dicke des kompaktierten Anteils des AWV nach der Kompaktierung
t_3	mm	Dicke des nicht kompaktierten Anteils des AWV während der Iteration
t_{it}	mm	virtuelle Schichtdicke des AWV
t_{nk}	mm	nicht kompaktierter Anteil des AWV nach beendeter Iteration
U	mm	Umfangslänge
u, v, w	mm	Verschiebungen

α	$^\circ$	Aufweitwinkel des Aufweitdorns
α_T	$\frac{1}{K}, \frac{1}{^\circ C}$	Wärmeausdehnungskoeffizient
Δ		Längen- (Δl), Radius- (Δr) oder Temperaturänderung (ΔT)
ε		Dehnung
φ		Faservolumenanteil, Luftanteil
λ	$\frac{W}{mK}$	Wärmeleitfähigkeit
ρ	$\frac{g}{cm^3}$	Dichte
σ	$\frac{N}{mm^2}$	Spannung
μ		Reibungskoeffizient
ν		Querkontraktionszahl
ω	$^\circ$	Wickel-, Faserwinkel

Indizes:

0	Ausgangszustand
1	Schicht 1
2	Schicht 2
3	Schicht 3
1,2	Schicht 1 und Schicht 2
0°	0°-Schicht
60°	60°-Schicht
0°/60°	0°-Schicht und 60°-Schicht
±60°	60°-Schicht
a	außen
i	innen
L	Luftanteil
mech	mechanisch
r, R	Radial
T	Thermisch
U	Umfang
z	z-Richtung
Zugkraft	aufgewendete Zugkraft
φ	Umfangsrichtung
$\parallel$	parallel

Superskripte:

T	nach der thermischen Aufweitung
^	auf den MSV bezogene Größe
(1), (n)	Iterationsindex

1 Einleitung

In den letzten Jahren erlangen bei technischen Anwendungen Bauteile aus Faser-Kunststoffverbunden (FKV) immer größere Bedeutung. Die großen Vorteile, wie eine extrem niedrige Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit und Steifigkeit kombiniert mit ausgezeichneter chemischer Beständigkeit, überwiegen meist die Nachteile, zu denen der höhere Materialpreis und die häufig aufwendige und damit teure Fertigung zählen.
Einsatzgebiete der FKV sind insbesondere die Luft- und Raumfahrtindustrie, aber auch der Fahrzeug- und Apparatebau. Vor allem rohrförmige FKV-Bauteile werden bereits seit längerer Zeit z.B. als Leitungsrohre oder Antriebswellen erfolgreich in Serie eingesetzt. Der Trend geht eindeutig dahin, hochbelastete Strukturbauteile aus endlosfaserverstärkten FKV zu fertigen.

Bisher wurden zur Herstellung von FKV in erster Linie duroplastische Matrixsysteme verwendet. Diese können bei Raumtemperatur verarbeitet werden und ermöglichen aufgrund ihrer niedrigen Viskosität eine gute Tränkung der Fasern. Ihr Vorteil liegt damit vor allem in einem relativ einfachen Herstellungsprozeß. Nachteilig ist, dass ein Umformen der Bauteile nach dem Aushärten der Matrix nicht möglich ist und dass nahezu keine Verfahren für ein effektives Recycling existieren.
Diese Probleme können durch die Verwendung thermoplastischer Matrixsysteme gelöst werden. Thermoplaste sind schmelz- und schweißbar und haben gegenüber den Duroplasten entscheidende Vorteile:

- umweltfreundliches Recycling
- leichte Umformbarkeit
- gutmütiges Bruchverhalten
- einfache Verbindungstechnik
- geringe Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme

Diesen Vorteilen stehen in erster Linie Nachteile bei der Bauteilfertigung gegenüber. Thermoplaste müssen im flüssigen Zustand, d.h. bei erhöhter Temperatur verarbeitet werden. Ihre Viskosität ist deutlich höher als die der Duroplaste, so dass besonderes Augenmerk auf den Tränkungsvorgang gelegt werden muss.
Um eine vollständige Fasertränkung zu realisieren, werden am Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen (KLuB) mehrere neue Herstellungsverfahren für FKV mit thermoplastischer Matrix entwickelt. Dies sind zum einen das Schmelz-Druck-Formen (SDF) und das Schleuder-Schmelz-Verfahren, mit denen Rohre begrenzter Länge produziert werden können, und zum andern das Profil-Armierungs-Ziehen (PAZ), dessen Hauptvorteil eine mögliche kontinuierliche und damit kostengünstige Fertigung rohrförmiger FKV-Profile ist.
Gemeinsames Kennzeichen aller drei Verfahren ist, dass im ersten Fertigungsschritt ein thermoplastisches Kunststoffrohr, Kernrohr genannt, nach konventioneller Wickeltechnik mit einer Glasfaserwicklung belegt wird. Der Übergang vom bewickelten Kunststoffrohr zum eigentlichen Faser-Verbund-Bauteil erfolgt im zweiten Schritt, der Kompaktierung. Das thermoplastische Kernrohr wird von seiner Außenseite her aufgeschmolzen und der flüssige Thermoplast durch eine radial nach außen wirkende Kraft in die Faserzwischenräume gedrückt.

Die drei genannten Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich in der Erzeugung der für die Kompaktierung des Laminates erforderlichen Kraft. Während beim Schmelz-Druck-Formen die Kraft hydraulisch durch eine unter Druck stehende Flüssigkeit im Innern des Kernrohres erzeugt wird, versetzt man beim Schleuder-Schmelz-Verfahren das Rohr samt Wicklung in Rotation und erhält dadurch eine radial nach außen wirkende Fliehkraft. Beim PAZ-Verfahren wird die Kraft mechanisch durch einen Aufweitdorn im Innern des Rohres erzeugt.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Verfahren ist es mit dem PAZ-Verfahren bisher nicht gelungen, Bauteile befriedigender Qualität zu produzieren. Vor allem die Oberfläche der hergestellten Rohre erfüllt nicht die gestellten Anforderungen.

Hieraus ergibt sich die Aufgabenstellung für diesen Konstruktiven Entwurf. Das PAZ-Verfahren ist in seinem Grundprinzip so zu variieren, dass rohrförmige FKV-Bauteile zunächst in begrenzter Länge mit guter Qualität hergestellt werden können. Dazu müssen die Schwachpunkte der bestehenden Versuchseinrichtung (V.E.) ermittelt und im Rahmen einer Neukonstruktion durch eine Modifikation des Verfahrens beseitigt werden.
Das Fernziel ist es, die kontinuierliche Fertigung zu realisieren und es einem Industriepartner zu ermöglichen, mit dem PAZ-Verfahren in Serie zu gehen. Deshalb ist besonderes Augenmerk auf die Übertragbarkeit auf ein industrielles Verfahren zu legen.

2 Funktionsweise des Profil-Armierungs-Ziehens (PAZ)

Beim Profil-Armierungs-Ziehen handelt es sich um ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffprofilen mit thermoplastischer Matrix. Der grundlegende Unterschied zu den beiden anderen am Fachgebiet KLuB untersuchten Verfahren (Schmelz-Druck-Formen (SDF) und Schleuder-Verfahren) ist, dass sich das Prinzip des PAZ Verfahrens in einen kontinuierlichen Fertigungsprozeß integrieren läßt und damit erstmals die kontinuierliche Produktion von endlosfaserverstärkten Rohren ermöglicht.

Der Verfahrensablauf beim PAZ-Verfahren gliedert sich in zwei Schritte:

Im ersten Schritt erfolgt die trockene Bewicklung eines als Kernrohr bezeichneten thermoplastischen Kunststoffrohres mit einer Hybridfaser. Die Hybridfaser besteht aus Verstärkungsfasern sowie thermoplastischen Matrixfasern. Im jetzigen Erprobungsstadium des PAZ-Verfahrens wird nach konventioneller Wickeltechnik auf einer normalen Wickelmaschine bewickelt, so dass nur ein in seiner Länge beschränktes Versuchsrohr hergestellt werden kann.

Der Übergang vom bewickelten Kunststoffrohr zum fertigen FKV-Bauteil vollzieht sich im zweiten Schritt, dem eigentlichen PAZ-Verfahren. Ziel ist es, die Kompaktierung des Versuchsrohres, d.h. eine vollständige Tränkung der außen liegenden Glasfasern mit der Matrix zu erreichen.

Idealisiert betrachtet läuft der Prozeß wie folgt ab:

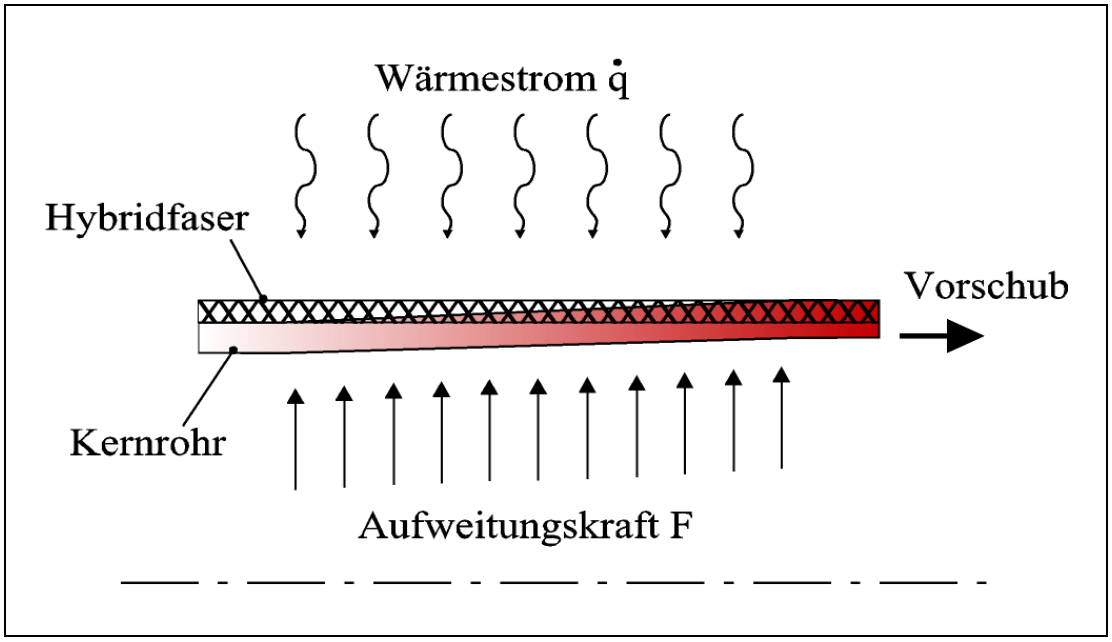


Bild 2.1 Funktionsweise des PAZ-Verfahrens

Das Kernrohr wird mit kontinuierlichem Vorschub über ein Umformwerkzeug gezogen. Dieses erfüllt zwei Aufgaben:
Zum einen wird dem Kernrohr von außen ein Wärmestrom $\dot{q}$ zugeführt, zum anderen erfährt es von innen eine elastische Aufweitung durch eine Aufweitungskraft F.
Durch die Erwärmung schmelzen zunächst die außen liegenden thermoplastischen Fasern des Hybrid-Rovings auf. Anschließend geht das Kernrohr an seiner Außenoberfläche in den flüssigen Zustand über. Die nachfolgende Aufweitung des nicht aufgeschmolzenen Anteils des Kernrohres führt dazu, dass der flüssige Thermoplast radial nach außen in die Wicklung gedrückt wird. Die dort befindliche Luft wird verdrängt und eine Durchtränkung der Fasern mit der Matrix erreicht.

Für eine spätere kontinuierliche Fertigung müssen die getrennten Fertigungsschritte, d.h. Herstellen und Bewickeln des thermoplastischen Kernrohres sowie Aufschmelzen und Kompaktieren in einem kombinierten Prozeß vereinigt werden. Dazu muss das Kernrohr im Extrusionsverfahren gefertigt und sofort nach seinem Austritt aus dem Extruder bewickelt werden. Direkt im Anschluß erfolgt die Kompaktierung mit Hilfe das PAZ-Verfahrens. Der Fertigungsprozeß könnte wie folgt aussehen:

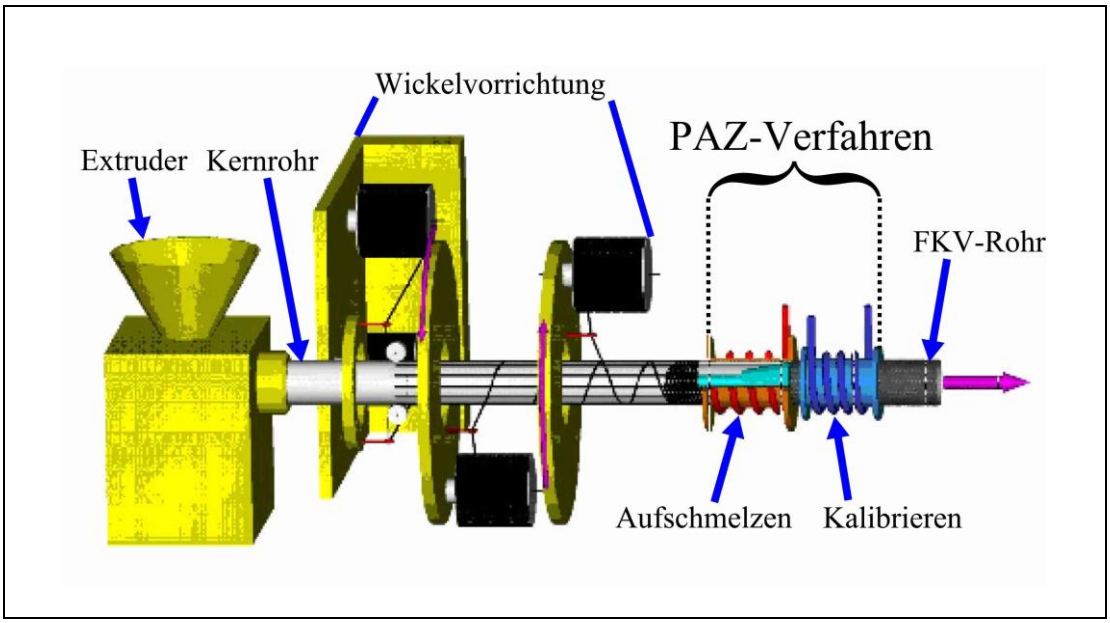


Bild 2.2 Kontinuierliche Fertigung mit dem PAZ-Verfahren

2.1 Bisherige Umsetzung des PAZ-Verfahrens

Nach Klärung der prinzipiellen Funktionsweise des PAZ-Verfahrens, muss die Umsetzung des Verfahrens in der bestehenden Versuchseinrichtung untersucht werden. Die bisher realisierte Lösung sieht wie folgt aus:

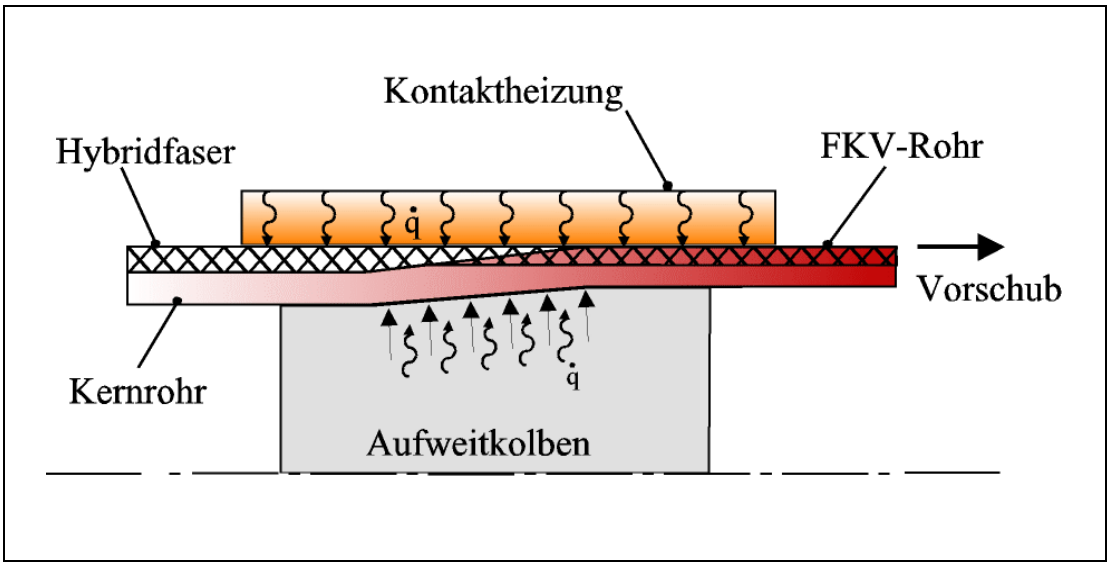


Bild 2.3 Prinzip der bisher realisierten Lösung

Um die benötigte Aufweitung zu erzeugen, wird das Kernrohr über einen konischen Kolben gezogen. Die Zufuhr der für den Schmelzvorgang benötigten Wärme erfolgt über eine Kontaktheizung, die in Form einer Heizkokille an der Außenseite der Wicklung anliegt. Die Durchmesservergrößerung des Kolbens treibt den flüssigen Anteil des Kernrohres radial nach außen in die Hybridwicklung und kompaktiert so das Versuchsrohr.
An den eigentlichen Umformbereich schließt sich ein Kühl- und Kalibrierbereich an (in Bild 2.3 nicht dargestellt), in dem das kompaktierte Rohr abgekühlt und verfestigt wird. Der Kolben hat damit einen zweiteiligen Aufbau aus Aufweitbereich und Kalibrierbereich.

Zur besseren Kontrolle des radialen Temperaturverlaufes im Kernrohr ist in der bestehenden Versuchseinrichtung eine Innentemperierung des Kolbens sowohl im Heiz- als auch im Kühlbereich vorgesehen.

Das vorgestellte Grundprinzip des PAZ-Verfahren ist in folgenden Gesamtablauf integriert:
Der Kolben zur Aufweitung des Kernrohres ist an der Spitze eines Trägerrohres befestigt. Auf dieses wird vor Versuchsbeginn das bewickelte Kernrohr aufgeschoben. Anschließend wird das Trägerrohr horizontal in einer Halterung befestigt. Nach der Instalation der Heizung wird das Versuchsrohr mit Hilfe eines Hydraulikzylinders, an dem ein Stahlseil angreift, über den Kolben gezogen und dabei kompaktiert.
Das prinzipielle Vorgehen kann folgender Übersichtsskizze entnommen werden:

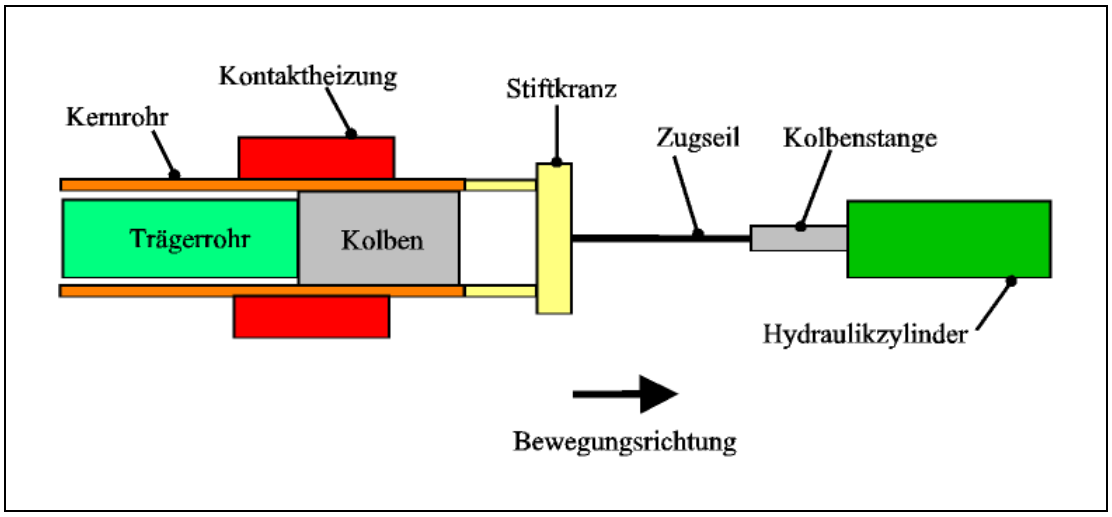


Bild 2.4 Verfahrensablauf bei der bestehenden Versuchseinrichtung

2.2 Erzielte Ergebnisse

Beim Studium der Versuchsberichte [16, 17] und bei der Begutachtung der bisherigen Ergebnisrohre fallen vor allem zwei wesentliche Probleme der bestehenden Versuchseinrichtung auf:

- Es kann nur teilweise eine befriedigende Oberflächenqualität erreicht werden (dies bezieht sich sowohl auf die Außenoberfläche als auch auf die Innenoberfläche des Versuchsrohres).
- Die Vorschubgeschwindigkeit ist für eine industrielle Fertigung viel zu gering.

Ferner wird deutlich, dass es bei den bisher durchgeführten Versuchen nicht möglich war, die Prozeßparameter während eines Versuches konstant zu halten. So wechseln sich auf der Länge der Versuchsrohre Abschnitte in denen akzeptable Oberflächen bei guter Fasertränkung vorliegen mit solchen ab, in denen die Oberflächen zerklüftet und rau sind und keine ausreichende Tränkung erreicht wurde. Zusätzlich ist eine ungleichmäßige Verteilung der Glasfasern über dem Umfang festzustellen.

2.3 Schwachpunkte

Die bisher durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass mit dem PAZ-Verfahren die kontinuierliche Fertigung von faserverstärkten Rohren möglich ist. Das dies bis jetzt nicht in befriedigender Qualität gelungen ist, hat bei genauerer Untersuchung drei wesentliche Ursachen. Sie sind im folgenden mit

- Ringspaltproblem
- Temperierungsproblem
- Konstruktive Mängel

bezeichnet.

2.3.1 Ringspaltproblem

In der bestehenden Versuchseinrichtung wird das Versuchsrohr durch einen Ringspalt gezogen. Dieser liegt zwischen dem Kolben im Inneren des Rohres und dem Ringheizkörper (Bild 2.5). Der Ringspalt ist in seiner Querschnittsfläche konstant und unveränderlich und daher nur auf eine ganz bestimmte Wanddicke des Versuchsrohres ausgelegt. Wanddickenschwankungen des Kernrohres sowie Unregelmäßigkeiten in der Hybridfaserwicklung werden aus diesem Grund von der bisherigen Anlage sehr schlecht toleriert. Sie führen bei konstanter Abzugskraft zwangsläufig zu einer schwankenden Abzugsgeschwindigkeit. Damit kommt es bei konstanter Heizleistung zu einer ungleichmäßigen Erwärmung der Versuchsrohre und damit zu einer über die Länge des Versuchsrohres schwankenden Aufschmelztiefe.

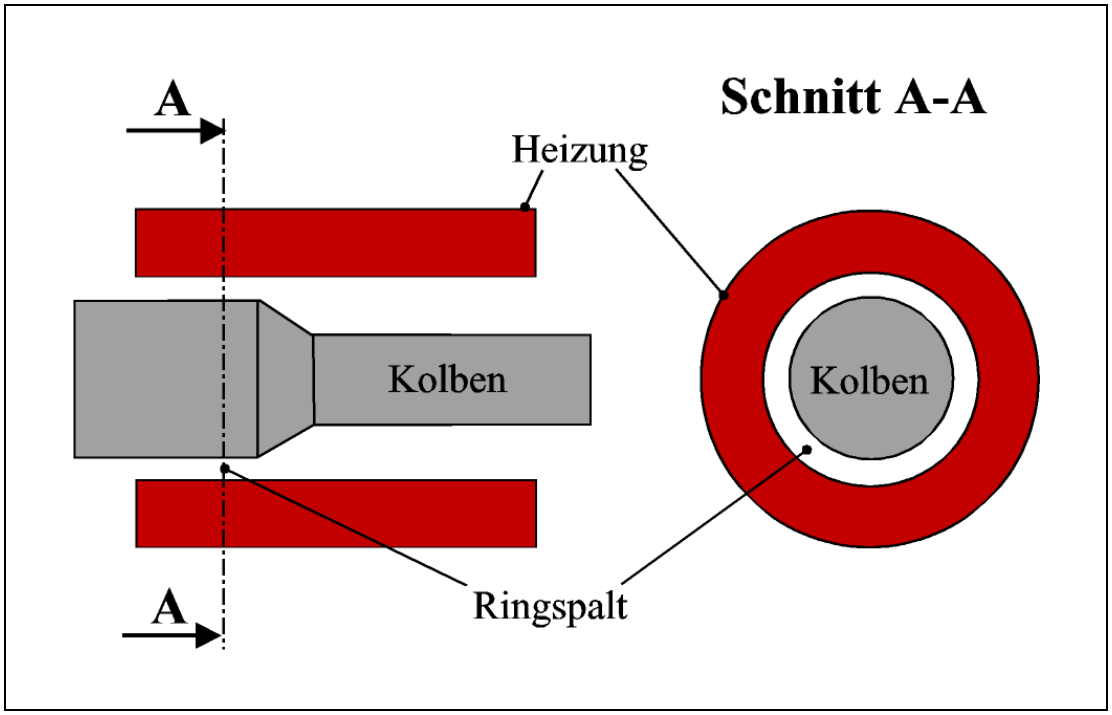


Bild 2.5 Ringspalt

Die Aufschmelztiefe ist für die Stabilität des Rohres während des Versuches sowie für die erreichbare Qualität des Verbundes von entscheidender Bedeutung.
Bei zu großer Aufschmelztiefe bzw. im ungünstigsten Fall beim Durchschmelzen des Kernrohres verliert das Versuchsrohr im Bereich der Aufweitung an Stabilität, was zum Abbruch des Versuches führt. Ein Durchschmelzen ist deshalb unbedingt zu vermeiden.
Ist andererseits die Aufschmelztiefe zu gering, wird zu wenig flüssiger Thermoplast nach außen in die Wicklung gedrückt. Dadurch werden die Kompaktierung und Fasertränkung negativ beeinflußt.
Zur Einhaltung der optimalen Aufschmelztiefe müssen Vorschubgeschwindigkeit und Heizleistung beim PAZ-Verfahren exakt aufeinander abgestimmt werden. Durch den Ringspalt und die damit verbundenen Schwankungen in der Vorschubgeschwindigkeit wird die Abstimmung erheblich erschwert.

Den Ringspalt in seiner bisherigen Form beizubehalten würde bedeuten, die aus dem schwankenden Vorschub resultierende diskontinuierliche Erwärmung durch eine Regelung zu beseitigen. Dazu müsste entweder die Abzugskraft geregelt werden, um so einen konstanten Vorschub zu erhalten, oder die Heizleistung müsste an den variablen Vorschub angepaßt werden. Beides ist technisch nur schwer umzusetzen.
Eine andere Möglichkeit besteht darin, den schwankenden Vorschub durch den Einsatz von Kernrohren mit sehr kleinen Wanddickenschwankungen zu vergleichmäßigen. Solche hochpräzisen Kernrohre sind in der Herstellung aufwendig und teuer und scheiden damit für die geplante Massenfertigung mit Hilfe des PAZ-Verfahrens aus.

Zur Lösung des Problems bleibt daher nur die Möglichkeit, auf den Ringspalt zu verzichten bzw. diesen in seinem Querschnitt variabel zu gestalten.
Dadurch können zwei weitere Probleme gelöst werden, die in enger Beziehung mit dem Ringspaltproblem stehen:

- Eine an der Außenseite des Versuchsrohres anliegende Heizkokille bewirkt, dass die im Zuge die Aufweitung aus der Wicklung verdrängte Luft nicht vollständig entweichen kann. Sie verbleibt in den äußeren Schichten des Verbundes und ist damit die Ursache für die schlechte Oberflächenqualität der Versuchsrohre.
- Die Kontaktheizung führt zu einer Verschiebung der lose auf der Außenseite des Kernrohres liegenden Hybridfasern.

Aus diesen Betrachtungen folgt:

⇨ Die Forderung auf einen Verzicht bzw. eine variable Querschnittsfläche des Ringspaltes wird als Festforderung in das Lastenheft des PAZ-Verfahrens aufgenommen.

2.3.2 Temperierungsproblem

Neben der diskontinuierlichen Erwärmung des Rohres aufgrund von Stauungen am Ringspalt spielt bei der Wärmezuführung im PAZ-Verfahren ein weiterer Faktor eine wesentliche Rolle:
Um die Temperatur am Außenumfang des Kolbens im Aufweitbereich konstant zu halten, wird in der bisherigen Versuchseinrichtung ein Temperiergerät eingesetzt, das temperiertes Wasser durch das Innere des Kolbens im Aufweitbereich pumpt. Aus dem Durchschmelzen des Kernrohres muss geschlossen werden, dass die Leistung des Temperiergerätes nicht ausreicht, um die Außentemperatur des Kolbens konstant zu halten. Im Falle einer Stauung am Ringspalt ist es nicht möglich, die von außen eingebrachte erhöhte Wärmemenge schnell genug über den Kolben abzuführen. Es kommt zur Überhitzung und zum Durchschmelzen.
Andererseits gelingt es bei erhöhten Vorschubgeschwindigkeiten nicht, eine unzureichende Wärmeeinbringung von außen durch eine erhöhte Wärmezufuhr über den Kolben zu kompensieren. Die Wicklung kann in diesen Bereichen nicht vollständig mit dem Kernrohr verschweißt werden.

Mit der verwendeten Temperierungseinrichtung ist es daher nicht möglich, einen vorgegebenen radialen Temperaturverlauf im Kernrohr während des Versuches einzuhalten. Damit ist keine Steuerung der Schmelzfront bzw. der Aufschmelztiefe im Kernrohr möglich.
Die Lösung liegt in der Verwendung eines schnell zu regelnden Temperiergerätes mit entsprechender Leistung.

⇨ Die Forderung nach einem leistungsfähigen Temperiergerät, dass eine konstante, unabhängig von der Außenheizung einstellbare Temperatur des Aufweitbereichs ermöglicht, wird als Festforderung in das Lastenheft des PAZ-Verfahrens aufgenommen.

2.3.3 Konstruktive Mängel

Die bestehende Versuchseinrichtung erlaubt keine Trennung der unterschiedlichen Bauteile des Kolbens. Die entscheidenden geometrischen Parameter, wie Länge des Aufweit- und Kalibrierbereiches sowie Durchmesser und Winkel des Aufweitdorns, sind unveränderlich und fest vorgegeben. Ein Austausch einzelner Komponenten ist nicht möglich.
Rechnungen über die benötigte Aufweitung oder den bei Abkühlung auftretenden Schrumpf gehen von vereinfachenden Annahmen über die in Realität komplexen und instationären Vorgänge vor allem im Bereich der Aufweitung aus. Deshalb kann es unter Umständen nötig sein, einzelne geometrische Parameter, die durch eine überschlägige Rechnung ermittelt wurden, später zu ändern und an gewonnene Versuchsergebnisse anzupassen. Um mit der Versuchseinrichtung Versuchsreihen mit veränderlichen geometrischen Parametern ohne großen Aufwand durchführen zu können, muss die Neukonstruktion möglichst variabel im Aufbau gehalten werden. Der Austausch einzelner Komponenten muss ohne Änderung des Gesamtaufbaus möglich sein .

⇨ Die Forderung nach einem möglichst variablen, modularen Aufbau der neuen Versuchseinrichtung wird deswegen als Festforderung in das Lastenheft des PAZ-Verfahrens aufgenommen.

3 Prinzipielle Neukonstruktion

Inhalt dieses Kapitels ist die Suche nach alternativen Konzepten für die Konstruktion einer neuen PAZ-Versuchseinrichtung. Ziel ist es, ein Lösungsprinzip zu entwickeln, das den grundsätzlichen Anforderungen gerecht wird. Die detaillierte Umsetzung der gewählten Variante wird anschließend in Kapitel 4 beschrieben.

3.1 Anforderungsliste

Im Zuge der Ideenfindung für die Neukonstruktion müssen vor allem die in Kapitel 2 formulierten Anforderungen berücksichtigt werden, die auf eine Beseitigung der Schwachpunkte der bestehenden Versuchseinrichtung abzielen. Sie werden ergänzt durch die Forderung nach möglichst geringen Investitionskosten für den neuen Versuchsstand.
Zusammengefaßt ergeben sich als Ausgangspunkt für die Neukonstruktion folgende Anforderungen:

Innenbereich	
FF	Leistungsfähiges Temperiergerät, Temperatur frei wählbar
FF	Variabler, modularer Aufbau des Innenbereiches, möglichst geringer Montageaufwand
W	Konstruktion muss auch für andere Geometrien anwendbar sein
Außenbereich	
W	Möglichst Verzicht auf eine Außenkokille
W	Konstruktion muss auch für andere Geometrien anwendbar sein
Konstruktion allgemein	
FF	Kein Ringspalt oder variabler / versetzter Ringspalt in der V.E.
W	Kontinuierliche Fertigung berücksichtigen (=> möglichst hohe Vorschubgeschwindigkeit)
FF	Investitionskosten möglichst gering halten
FF	Verwendung vorhandener Bauteile

Legende: FF: Festforderung
W: Wunsch

Tabelle 3.1 Grundsätzliche Anforderungen für die Neukonstruktion

Zusätzlich müssen vor Beginn der Neukonstruktion Geometrie und Aufbau von Kernrohr und Wicklung festgelegt werden. Diese gehen in die Rechnung ein und haben damit Auswirkungen auf die Werkzeugabmessungen.

- Aufbau und Geometrie des Kernrohres
  Das Kernrohr ist zweischichtig aufgebaut, wobei die einzelnen Schichten aus unterschiedlichen Polyamid-Polymerisaten bestehen. Auf eine 3 mm dicke Schicht aus PA 6 wird außen eine 2 mm dicke Schicht aus PA 12 aufgebracht.
  Der Grund für diese Anordnung ist, dass das PA 12 Polymerisat an der Außenseite ein anderes Schmelzverhalten als das PA 6 an der Innenseite aufweist. Die Schmelztemperatur von PA 12 liegt etwa 20 °C unter der von PA6.

Damit bleibt der PA 6 Anteil im Innern des Kernrohres fest, wenn das außen liegende PA 12 bereits aufgeschmolzen ist. Einem Durchschmelzen des Kernrohres wird auf diese Weise entgegengewirkt. Zusätzlich ist die Viskosität des PA 12 nach Überschreiten der Schmelztemperatur wesentlich geringer als die von PA 6. Dadurch ist eine effektivere Tränkung der Wicklung möglich.
Insgesamt ergibt sich eine Wanddicke des Kernrohres von 5 mm. Der Außendurchmesser beträgt 94 mm, die Länge 1320 mm.
Zusätzlich werden die Kernrohre nachbearbeitet und mit geringen geometrischen Abweichungen ausgeführt. Damit soll der Einfluß von Störgrößen, die aus der Kernrohr-Geometrie resultieren, minimiert werden.

- Aufbau der Wicklung:
  Die Wicklung besteht aus einer Polyamid / E-Glas Hybridfaser mit einem Faservolumenanteil von $\varphi_{GF} = 32$ %. Sie wird auf eine kombinierte Belastung aus Innendruck und Biegung ausgelegt und besteht daher aus einer 0°-Lage, auf die ein AWV mit $\omega=\pm60°$ aufgebracht wird. Da die 0°-Schicht nicht mit institutseigenen Mitteln hergestellt werden kann, wird sie durch einen AWV mit $\omega=\pm10°$ ersetzt.
  Es ergibt sich folgender Laminataufbau:
  - AWV mit $\omega=\pm10°$ direkt auf dem Kernrohr
  - AWV mit $\omega=\pm60°$ an der Außenseite

Die Anforderungen an Kernrohr und Wicklung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Geometrie des Kernrohres		
FF	Länge des Kernrohres	1320 mm
RE	Außendurchmesser des Kernrohres	94 mm
RE	Wanddicke	5,0 mm
W	Kernrohr mit geringen geometrischen Abweichungen , notfalls nacharbeiten	+/- 0,1mm
FF	Geradheit des Kernrohres	3mm/m
ZF	Kalibrierverfahren (Außenkalibrierung / Innen-kalibrierung) der Rohre wird als Parameter festgehalten	
Material des Kernrohres		
FF	Polyamid Mischpolymerisat aus PA6 und PA12 3 mm PA6 innen, 2mm PA12 außen	PA6/PA12
RE	Rohre feingedreht	
Wicklung		
FF	Auslegen auf Belastung durch Zug- und Innendruck	
RE	+/- 10° AWV auf dem Kernrohr	+/-010°
RE	Eine Faserlage +/- 60°	+/- 60°
Material der Wicklung		
FF	Hybridfaser PA/E-Glas	
RE	Faservolumenanteil	32%
RE	Stärke des Rovings	375 tex
FF	Außenabzug von Spule	

Legende:

FF:	Festforderung	W:	Wunsch
ZF:	Zielforderung	RE:	Realisierung

Tabelle 3.2 Anforderungen an Kernrohr und Wicklung

Im Rahmen der Detailkonstruktion in Kapitel 5 werden an die einzelnen Funktionsträger der gewählten Lösungsvariante weitere Anforderungen formuliert. Eine Übersicht über sämtliche Anforderungen an den Versuchsstand kann dem Anhang entnommen werden.

3.2 Methodik

Zur Lösungsfindung wird ein methodisches Vorgehen gewählt, das in mehrere Schritte unterteilt ist:

Im ersten Schritt wird die Funktionsstruktur für das PAZ-Verfahrens aufgestellt. Dazu wird die Gesamtfunktion des PAZ-Verfahrens in Teilfunktionen zerlegt. Die Teilfunktionen werden hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Gesamtablauf des Verfahrens in Haupt- und Nebenfunktionen gegliedert.

Nach der Formulierung der Teilfunktionen werden im nächsten Schritt für die relevanten Funktionen sogenannte Wirkprinzipien ermittelt. Wirkprinzipien beruhen auf der Nutzung physikalischer Effekte unter Festlegung geeigneter geometrischer und stofflicher Größen. Der Zusammenhang zwischen Funktion und Wirkprinzip sieht wie folgt aus:

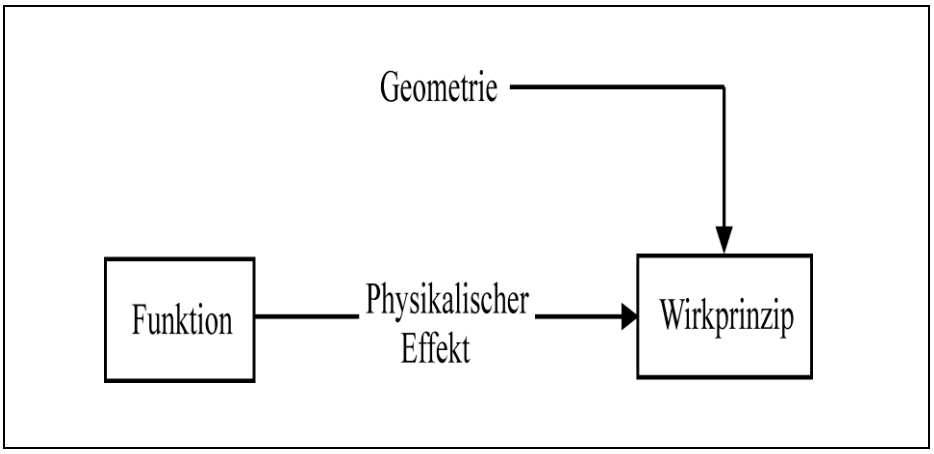


Bild 3.1 Wirkprinzip

Die Nutzung verschiedener Wirkprinzipien und damit verschiedener physikalischer Effekte für die Realisierung der Teilfunktionen führt jeweils zu unterschiedlichen Möglichkeiten der konstruktiven Umsetzung. Sinnvolle Kombinationen der Umsetzungen der Teillösungen ergeben Varianten der Gesamtlösung. Aus diesen ist im letzten Schritt anhand eines Bewertungsschemas die Optimallösung auszuwählen.

3.3 Funktionsstruktur des PAZ-Verfahrens

Ziel des PAZ-Verfahrens ist es, aus den Ausgangsmaterialien, Thermoplastrohr und Hybridroving, ein Verbundrohr herzustellen. Wie in Kapitel 2 erläutert, läuft der Prozeß im jetzigen Versuchsstadium in zwei getrennten Schritten ab. Der Wickelvorgang ist vom eigentlichen PAZ-Verfahren getrennt.
Es ergibt sich folgende Gesamtfunktion:

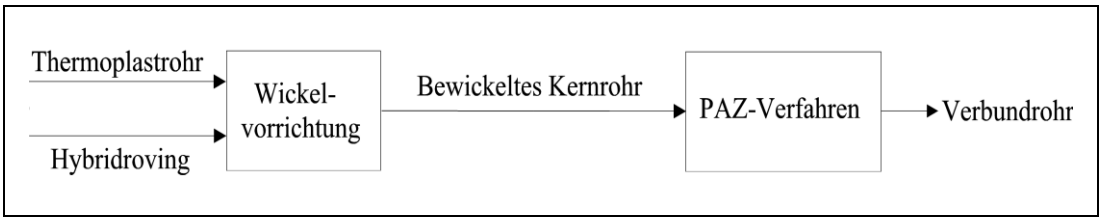


Bild 3.2 Gesamtfunktion des PAZ-Verfahrens

Die Neukonstruktion bezieht sich in erster Linie auf die Umsetzung des eigentlichen PAZ-Verfahrens. Der Wickelvorgang wird deshalb aus den weiteren Ausführungen ausgeschlossen.

Die Hauptfunktionen beim PAZ-Verfahrens umfassen die Kompaktierung, d.h. die Herstellung des eigentlichen Verbundes sowie die Stabilisierung, d.h. die Abkühlung des heißen und instabilen Verbundrohres. Sie bewirken zusammen den Übergang vom trocken bewickelten Kernrohr zum Verbundrohr.

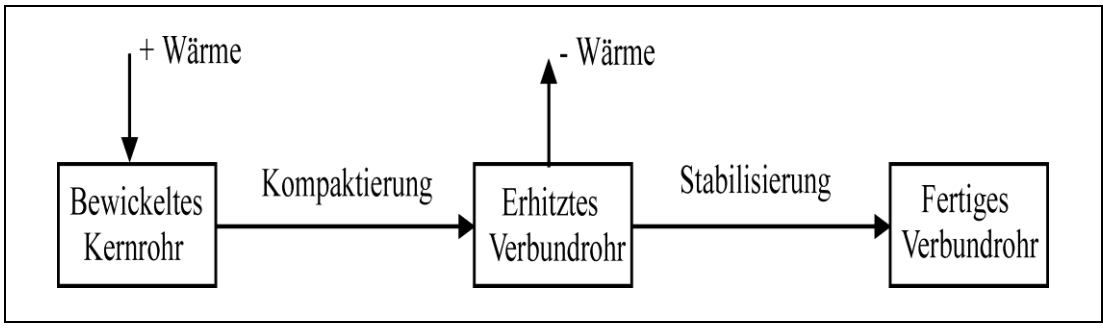


Bild 3.3 Hauptfunktionen des PAZ-Verfahrens

Nebenfunktionen sind für die Umsetzung des PAZ-Verfahrens von nachrangiger Bedeutung und betreffen vor allem den Verfahrensablauf. Zu den Nebenfunktionen zählen:

- Erzeugen und Einleiten der Zugkräfte
- Leiten der Heiz- bzw. Kühlmedien
- Führung des Versuchsrohres in den einzelnen Versuchsabschnitten

In der Funktionsstruktur des PAZ-Verfahrens erfordern die Hauptfunktionen, d.h. die Kompaktierung und die Stabilisierung eine grundsätzliche Neuüberlegung. Die Analyse in Kapitel 2 hat gezeigt, dass die Hauptprobleme in der bestehenden V.E. vor allem in der mangelhaften Umsetzung der Hauptfunktionen begründet liegen. Für die Neukonstruktion muss daher das Hauptaugenmerk auf alternative Wirkprinzipien für die Umsetzung der Hauptfunktionen gelegt werden.
Bei den Nebenfunktionen sind zwei Punkte zu beachten:

- Der grundsätzliche Verfahrensablauf beim PAZ-Verfahren, d.h. die Verwendung eines Trägerrohres zur Aufnahme des Versuchsrohres vor Versuchsbeginn und der Einsatz eines Hydraulikzylinders zur Erzeugung der Zugkräfte, hat sich bewährt.
- Entsprechend der Anforderungsliste sollen die Herstellkosten möglichst gering gehalten werden.

Unter diesen Voraussetzungen liegt es nahe, den prinzipiellen Verfahrensablauf aus der bestehenden Versuchseinrichtung zu übernehmen. Auf diese Weise können eine Vielzahl bereits angeschaffter bzw. hergestellter Teile (Hydraulikzylinder, Hydraulikaggregat, Halterung für Trägerrohr) aus der alten V.E. übernommen und die Herstellkosten für den neuen Versuchsstand gesenkt werden.
Mit der Vorgabe des Verfahrensablaufs sind die Wirkprinzipien der Nebenfunktionen größtenteils festgelegt. Die Nebenfunktionen werden deshalb nicht explizit betrachtet, sondern ihre Umsetzung bei er Besprechung der Detailkonstruktionen der einzelnen Elemente der neuen V.E. dargestellt.

Im folgenden werden nur die Hauptfunktionen gesondert untersucht.

3.4 Alternative Wirkprinzipien zur Umsetzung der Hauptfunktionen

Beim PAZ-Verfahren ist bei den Hauptfunktionen zwischen Kompaktierung und Stabilisierung zu unterscheiden.

a) Kompaktierung:
   Die Kompaktierung, d.h. der Übergang vom trocken bewickelten Kernrohr zum Faserverbundrohr, vollzieht sich in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden der PA-Faseranteil der Hybridwicklung und das Kernrohr an seiner Außenseite aufgeschmolzen. Der flüssige Thermoplast wird im zweiten Schritt radial nach außen in die GF-Wicklung gepreßt und verdrängt die dort verbliebene Luft. Somit kann die Kompaktierung untergliedert werden in:

   - Aufschmelzen des PA-Anteils der Hybridwicklung und des Kernrohres
   - Tränkung der GF-Wicklung

b) Stabilisierung:
   Nach der Kompaktierung muss das erhitzte Verbundrohr durch Wärmeentzug in einen stabilen Zustand überführt werden. Gleichzeitig muss eine Kalibrierung und damit eine Glättung der Oberfläche erfolgen.
   Beim Stabilisieren des Verbundrohres ist deshalb zu unterscheiden zwischen:

   - Abkühlung
   - Kalibrierung

Entscheidend für die Funktionsweise des PAZ-Verfahrens ist die technische Realisierung dieser beiden Hauptfunktionen. Sie stellen die kritischen Funktionen in der Funktionsstruktur des Verfahrens dar und werden deshalb genau untersucht. Für die physikalische Umsetzung der Hauptfunktionen ergeben sich folgende Möglichkeiten:

3.4.1 Wirkprinzipien für die Kompaktierung

Die Kompaktierung unterteilt sich in Aufschmelzen und Tränken.

a) Aufschmelzen:
Für den Aufschmelzvorgang muss dem Versuchsrohr Wärme zugeführt werden. Da das Kernrohr nur an seiner Außenseite aufgeschmolzen werden soll, kann die Wärmeeinbringung nur von außen erfolgen.
Aus der Thermodynamik sind drei Formen des Wärmeübergangs bekannt:

- Wärmeleitung (stoffgebunden)
- Konvektion (stoffgebunden)
- Wärmestrahlung (nicht stoffgebunden)

Wärmeleitung beruht auf der Energieübertragung zwischen zwei Körpern bei Berührung. Im Fall des PAZ-Verfahrens erfordert sie den Kontakt zwischen Heizung und Versuchsrohr. Dazu muss ein **Ringheizkörper** an der Außenoberfläche des Versuchsrohres anliegen. Diese Form der berührenden Heizung entspricht der Ausführung in der bestehenden V.E.
Bei der **Konvektion** erfolgt der Wärmetransport durch Teilchen eines Fluids, die eine makroskopische Bewegung ausführen. Man unterscheidet zwischen natürlicher Konvektion infolge des natürlichen Auftriebes und erzwungener Konvektion durch äußere Kräfte (z.B. Gebläse). Für das PAZ-Verfahrens kommt bei konvektiver Wärmeeinbringung nur die erzwungene Konvektion in Form einer **Umluftheizung** in Frage. Natürliche Konvektion führt zu einem Wärmestau an der Rohrunterseite und damit zu einer ungleichmäßigen Erwärmung über dem Umfang.
Bei der **Wärmestrahlung** handelt es sich um einen Energietransport durch elektromagnetische Schwingungen. Er ist nicht stoffgebunden und kann auch im Vakuum erfolgen. Im Fall des PAZ-Verfahrens könnte die Erwärmung durch Strahlung mit Hilfe von **Heizstrahlern** erfolgen.
Zusammen mit der Erwärmung durch Umluft zählt die Strahlerheizung zu den berührungslosen Heizverfahren. Untergliedert nach berührenden und nicht berührenden Verfahren ergeben sich für das Aufschmelzen folgende prinzipielle Möglichkeiten:

- Berührende Heizung
  - ⇨ Kontakt- bzw. Kokillenheizung (Wärmeleitung)

- Berührungslose Heizung
  - ⇨ Umluft (Konvektion)
  - ⇨ Heizstrahler (Wärmestrahlung)

b) Tränken:
Im Zuge des Tränkungsprozesses soll die in der GF-Wicklung verbliebene Luft verdrängt werden. Dazu muss eine radiale Kraft aufgebracht werden, die den flüssigen Anteil des PA-Kernrohres nach außen in die Wicklung drückt.
Aufgrund der Versuchsanordnung mit fest eingespanntem Trägerrohr und der Forderung, eine kontinuierliche Fertigung zu berücksichtigen, kann die Erzeugung der Radialkraft nicht dynamisch, d.h. wie z.B. beim Schleuderverfahren durch Rotation des Versuchsrohres erfolgen. Die einzige Möglichkeit besteht darin, den innen liegenden festen Anteil des Kernrohres elastisch aufzuweiten. Dazu muss ein Umformwerkzeug in das Innere des Kernrohres eingebracht werden. Die außen auf dem Kernrohr liegende GF-Wicklung ist bei den benötigten Tränkungsdrücken von ca. 10 bar als starr zu betrachten, so dass sich durch die Aufweitung des festen Kernrohr-Anteils ein hydrostatischer Druck im flüssigen Anteil des PA-Kernrohres aufbaut. Dieser läßt flüssiges PA nach außen in die Wicklung fließen.

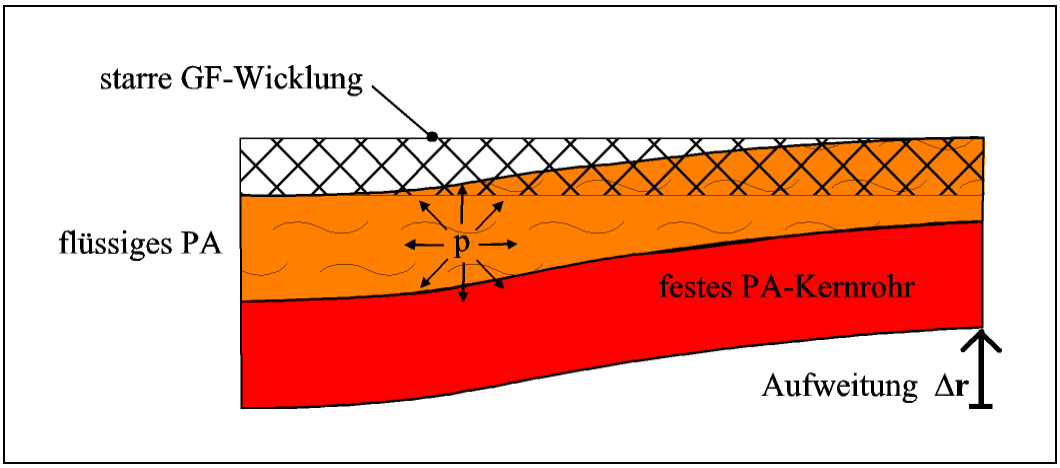


Bild 3.4 Entstehung des Tränkungsdruckes

Es bieten sich zwei Möglichkeiten der Aufweitung an:

- Mechanische Aufweitung
  Diese Art der Aufweitung ist in der bestehenden Versuchseinrichtung realisiert. Als Umformwerkzeug dient ein konischer Kolben, über den das Kernrohr gezogen wird. Die Durchmesservergrößerung des Kolbens bewirkt die Aufweitung des PA-Kernrohres.
  Durch den starren Kolben ist die Geometrie des Umformwerkzeuges unveränderlich.

- Hydraulische Aufweitung
  Bei der hydraulischen Aufweitung zirkuliert Wasser im Innern des Kernrohres. Die Wasserzirkulation ist auf den Umformbereich beschränkt. Wird das Wasser unter Druck gesetzt, baut sich ein Innendruck auf, der das Kernrohr aufweitet. Durch Änderung des Wasserdruckes kann die Aufweitung bzw. die Geometrie des „Umformwerkzeuges“ variiert werden.

Differenziert nach variablem und unveränderlichem Durchmesser des Umformwerkzeuges kann man die Tränkungsverfahren untergliedern in:

- Unveränderlicher Durchmesser
⇨ Mechanische Aufweitung

- Variabler Durchmesser
⇨ Hydraulische Aufweitung

3.4.2 Wirkprinzipien für die Stabilisierung

Die Stabilisierung muss zwischen Abkühlung und Kalibrierung unterteilt werden.

a) Abkühlung
Bei der Abkühlung muss dem erhitzten Versuchsrohr Wärme entzogen werden, damit das Verbundrohr die Umformvorrichtung in stabilem Zustand verläßt. Der Wärmeübergang kann nur durch Wärmeleitung erfolgen, erfordert also den direkten Kontakt zwischen Rohr und Kühlmedium.
Die Wärme kann sowohl auf der Innenseite als auch auf der Außenseite des Rohres abgeführt werden. Es ist zwischen Innenkühlung und Außenkühlung zu unterscheiden.
Die Außenkühlung hat den Vorteil, dass die Wärme direkt aus den stark erhitzten äußeren Bereichen des Versuchsrohres entzogen wird. Sie ist effektiver als die Innenkühlung, bei der eine mehr oder weniger große Strecke im nicht aufgeschmolzenen Anteil des PA-Kernrohres durch Wärmeleitung überwunden werden muss. Es ist zu berücksichtigen, dass PA ein sehr schlechter Wärmeleiter ist.

Bei den Möglichkeiten der Abkühlung kann demnach unterschieden werden zwischen:

- Innenkühlung durch Wärmeleitung
- Außenkühlung durch Wärmeleitung

b) Kalibrierung
Die Kalibrierung dient dazu, die Oberfläche des Versuchsrohres nach dem Umformen zu glätten und ihm definierte geometrische Abmessungen zu verleihen. Es ist zwischen Innenkalibrierung mit glatter Innenoberfläche und definiertem Innendurchmesser und Außenkalibrierung mit glatter Außenoberfläche und definiertem Außendurchmesser zu unterscheiden.
In der bestehenden V.E. wurde versucht, mit Hilfe des Ringspaltes Innenkalibrierung und Außenkalibrierung in einem einzigen Fertigungsschritt vorzunehmen. Dies hat sich als nicht praktikabel erwiesen. Für die neue V.E. besteht daher nur die Möglichkeit, sich auf eine der beiden Kalibrierungsmöglichkeiten zu beschränken. Bei nicht ausreichender Qualität der anderen, nicht kalibrierten Rohroberfläche muss die Möglichkeit untersucht werden, die Oberflächenqualität in einem zweiten Fertigungsschritt zu verbessern.

Zusammenfassend bestehen die Möglichkeiten der Kalibrierung aus:

- Innenkalibrierung
- Außenkalibrierung

3.5 Kombination der Teillösungen

Nach der Ermittlung unterschiedlicher Wirkprinzipien für die Teilfunktionen müssen diese zu sinnvollen Kombinationen für die Gesamtlösung zusammengesetzt werden. Dazu werden Einzellösungen für die beiden Hauptfunktionen Kompaktierung und Stabilisierung erarbeitet, die zu praktikablen Gesamtlösungen kombiniert werden.

3.5.1 Konstruktive Möglichkeiten für die Kompaktierung

Die konstruktive Umsetzung der Kompaktierung beinhaltet eine Kombination von Wirkprinzipien für Aufschmelzung und Tränkung. Sie wird in erster Linie durch die Forderung nach einer Lösung des Ringspaltproblems bestimmt. Dies impliziert entweder den Verzicht auf einen Ringspalt, oder seine Ausführung in geometrisch variabler Form. Daher scheiden Kombinationen, die ein starres Umformwerkzeuges mit einer starren Heizung verbinden, von vornherein aus. Darunter fällt die Paarung aus mechanischer Aufweitung durch einen Kolben mit Kontaktheizung über eine Außenkokille, wie sie in der bestehenden V.E. eingesetzt wird. Eine Variante dieser Anordnung, bei der die äußere Heizkokille nach dem Prinzip einer Photoblende mit variablem Durchmesser ausgeführt wird, bleibt aufgrund des damit verbundenen hohen konstruktiven Aufwandes unbeachtet.
Für die Lösung kommen nur Varianten in Frage, die entweder einen unveränderlichen Durchmesser des Umformwerkzeuges mit einer berührungslosen Heizung, oder einen variablen Werkzeugdurchmesser mit einer Kontaktheizung verbinden.

Es erscheinen zwei Kombinationen sinnvoll und technisch realisierbar:

1. Möglichkeit zur Realisierung der Kompaktierung

- Kombination von mechanischer Aufweitung mit kontaktloser Außenheizung
- Kein Ringspalt vorhanden, freiliegende Außenoberfläche

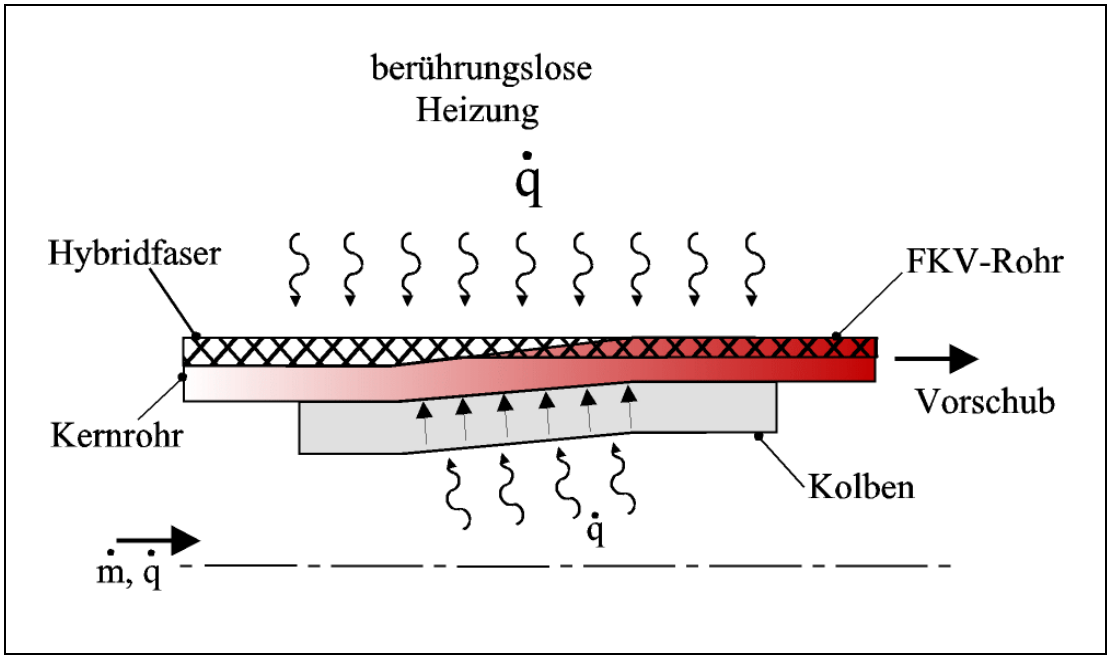


Bild 3.5 Mechanische Aufweitung mit berührungsloser Außenheizung

2. Möglichkeit zur Realisierung der Kompaktierung

- Kombination von hydraulischer Aufweitung mit Kokillenheizung
- variabler Ringspalt durch flexible Wassersäule im Rohrinnern

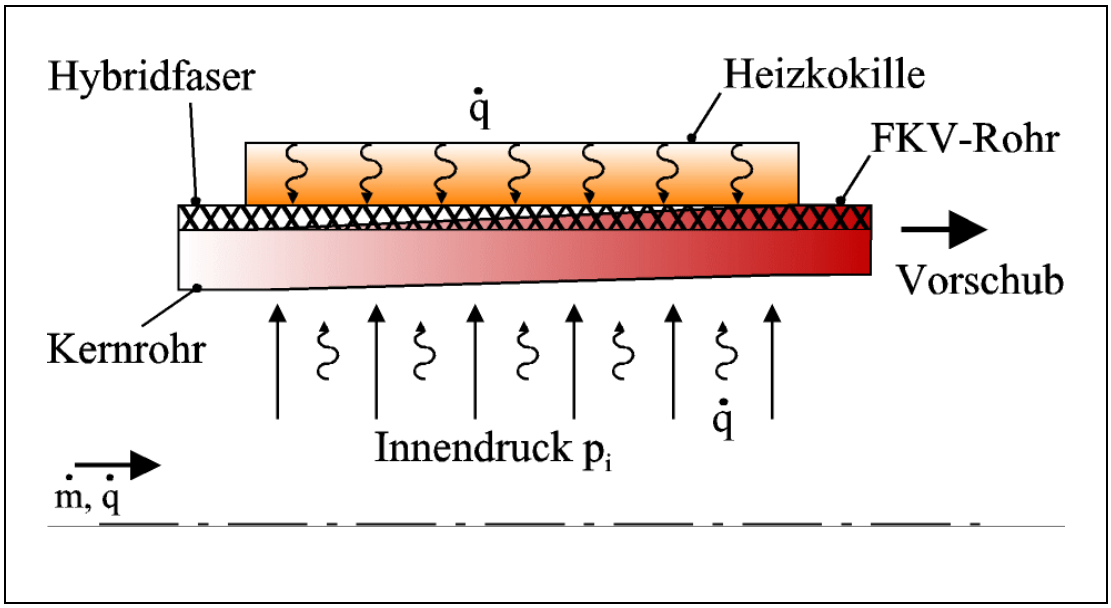


Bild 3.6 Hydraulische Aufweitung mit Kokillenheizung

Bei beiden Varianten ist zusätzlich das Temperierungsproblem zu berücksichtigen. Die Temperatur an der Innenseite des Versuchsrohres muss im Umformbereich durch Einsatz eines leistungsstarken Temperiergerätes frei wählbar sein und im Versuchsverlauf konstant gehalten werden können. Nur so kann eine effektive Steuerung der Schmelzfront im PA-Kernrohr erfolgen.
Zur Lösung des Problems steht als Temperiergerät ein Hochdruckreiniger der Firma Kränzle zur Verfügung. Er liefert Wasser mit einer Temperatur von maximal 150°C bei einem Druck von bis zu 100 bar und kann im Rahmen der zwei konstruktiven Möglichkeiten für die Kompaktierung wie folgt eingesetzt werden:

- Bei der mechanischen Aufweitung dient er zur Temperierung des Kolbens im Aufweitbereich. Dazu sind entsprechende Anschlüsse am Kolben und Strömungswege im Kolbeninneren bei der Neukonstruktion vorzusehen.. Das Prinzip entspricht dem der bestehenden V.E., wobei aufgrund der hohen Leistung des Hochdruckreinigers Probleme durch unzureichende Wärmezu- bzw. Abfuhr, wie sie bisher aufgetreten sind, nicht zu erwarten sind. Wichtig ist allerdings eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Kolbens.
- Bei der hydraulischen Aufweitung liefert der Hochdruckreiniger das benötigte Druckwasser und ist damit neben der Temperierung auch für die Aufweitung verantwortlich. Die Steuerung der Temperatur im Kolbeninnern erfolgt über die Wassertemperatur, die Regulierung der Aufweitung über den Wasserdruck.

3.5.2 Konstruktive Möglichkeiten für die Stabilisierung

Bei der konstruktiven Umsetzung der Stabilisierung ist das Ringspaltproblem zu berücksichtigen. Da sowohl für die Kühlung als auch für die Kalibrierung der unmittelbare Kontakt zwischen Werkzeug und Versuchsrohr erforderlich ist, können beide Vorgänge nur zusammen entweder auf der Innenseite, oder der Außenseite des Versuchsrohres durchgeführt werden. Sonst würde sich bei unveränderlichen Werkzeuggeometrien erneut ein Ringspalt ergeben.
Die möglichen Ausführungen sind:

- Innenkühlung mit gleichzeitiger Innenkalibrierung
  ⇨ Innenstabilisierung

- Außenkühlung mit gleichzeitige Außenkalibrierung
  ⇨ Außenstabilisierung

3.5.3 Mögliche Gesamtlösungen

Mögliche Gesamtlösungen setzten sich aus Einzellösungen für die Hauptfunktionen, Kompaktieren und Stabilisieren, zusammen. Es können nur solche Teillösungen kombiniert werden, bei denen das Ringspaltproblem gleich gelöst ist. Nur so kann vermieden werden, dass durch die Kombination der Teillösungen erneut ein Ringspalt auftritt.
Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich zwei mögliche Varianten:

a) Mechanische Aufweitung mit kontaktloser Außenheizung kombiniert mit Innenstabilisierung

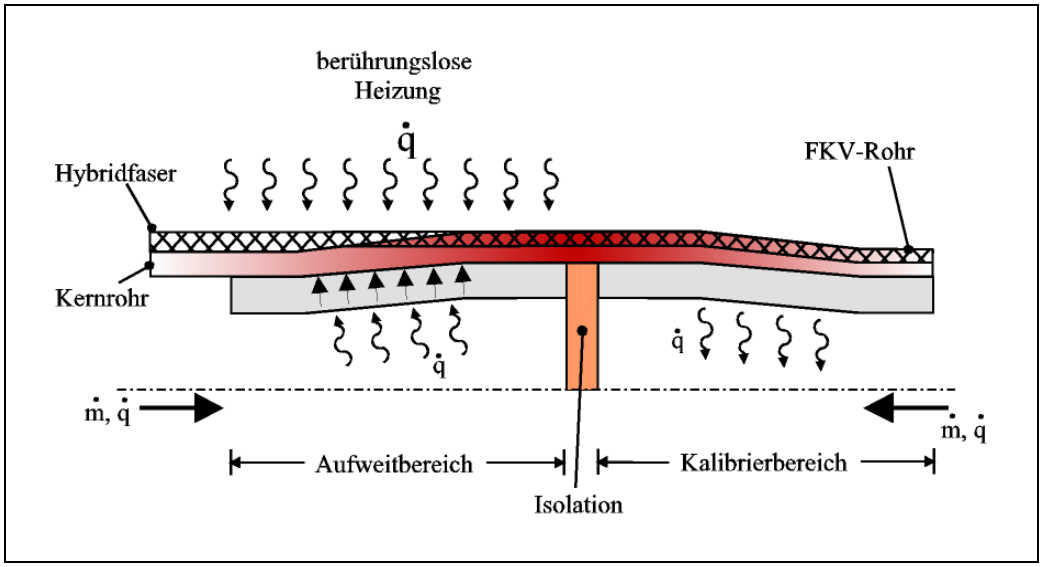


Bild 3.7 Lösungsmöglichkeit 1

Bei dieser Verfahrensvariante wird komplett auf den Ringspalt verzichtet. Das Versuchsrohr wird ähnlich wie in der bisherigen V.E. über einen Kolben gezogen, der in zwei thermisch getrennte Bereiche aufgeteilt ist. Der erste Bereich dient der mechanischen Aufweitung des Versuchsrohres und damit der Erzeugung des benötigten Tränkungsdruckes durch einen Aufweitdorn. Im Innern des Aufweitdorns zirkuliert temperiertes Wasser, das mit Hilfe des Hochdruckreinigers auf definierter Temperatur gehalten wird.
Vom Aufweitdorn thermisch durch eine Isolationsplatte getrennt, schließt sich ein gestufter, ebenfalls temperierter Kühlzylinder an, der innen von Leitungswasser durchströmt wird. Er ist für die Abkühlung und gleichzeitig für die Innenkalibrierung verantwortlich.
Die Beheizung und damit der Schmelzvorgang erfolgt durch eine berührungslose Außenheizung, die entweder in Form einer Strahlerheizung, oder als Umluftheizung ausgeführt werden kann.

b) Hydraulische Aufweitung mit Kokillenheizung kombiniert mit Außenkühlung und Außenkalibrierung

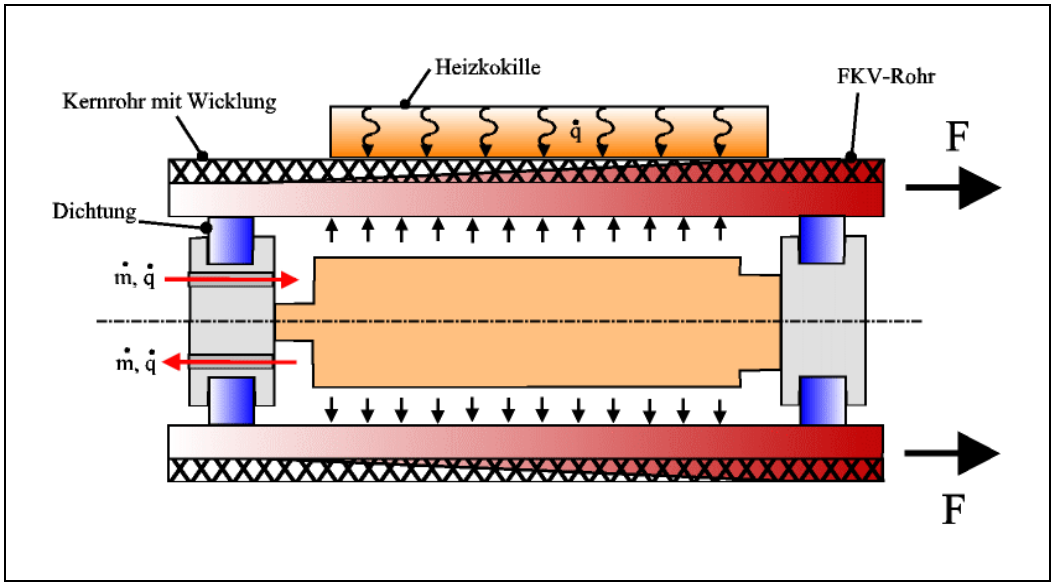


Bild 3.8 Lösungsmöglichkeit 2

In dieser Anordnung wird die erforderliche Aufweitung zur Erzeugung des Tränkungsdruckes durch temperiertes Druckwasser erzeugt, das im Innern des Versuchsrohres zirkuliert. Die Heizung ist wie in der bestehenden V.E. als Kontaktheizung in Form einer beheizten Außenkokille ausgeführt. Durch das Druckwasser liegt bei unveränderlichem Durchmesser der Außenkokille ein veränderlicher Innendurchmesser und damit ein variabler Ringspalt vor. Der Umformbereich muss mit Hilfe von Dichtungen gegen das Kernrohr gedichtet werden.
Die eigentliche Außenkokille ist zweiteilig ausgeführt. An den beheizten Bereich schließt sich ein gekühlter Bereich an, in dem die Abkühlung und die Außenkalibrierung des Verbundrohres erfolgt. Beide Bereich müssen thermisch voneinander getrennt werden.

3.6 Bewertung und Auswahl einer Gesamtlösung

Nach der Formulierung der möglichen Lösungskonzepte ist eine Bewertung und anschließend die Auswahl der optimalen Variante erforderlich. Dazu werden Vor- und Nachteile der beiden Lösungsvarianten in Tabellenform gegenübergestellt:

	PAZ-Verfahren mit mechanischer Rohraufweitung und kontaktloser Außenheizung	PAZ-Verfahren mit hydraulischer Rohraufweitung und Kontaktheizung über Außenkokille
Vorteile	+ Kein Ringspalt + Modularer Aufbau, schneller Wechsel von Bauteilen möglich + Viele Parameter kurzfristig änderbar + Eng an der bisherigen Lösung orientiert + Innenkalibrierung	+ Variabler Ringspalt durch Kompressibilität in den Zuleitungen + Sehr flexible Aufweitung des Versuchsrohres + Gute Außenoberfläche + Geringe Probleme mit Oxidation an der Oberfläche + Sehr guter Wärmeübergang im Inneren der V.E., gute Regelungsmöglichkeit der Innenraumtemperatur + Einfacher Aufbau + Insgesamt kostengünstige Lösung + Effektive Außenkühlung
Nachteile	- Mechanische Aufweitung nicht so „flexibel“ - Es existieren nur wenige Erfahrungen mit den in Frag kommenden Heizsystemen - Qualität der Außenoberfläche unbekannt, eventuell Glättungseinrichtung notwendig - u.U. Oxidation des Versuchsrohres, nur durch aufwendige Konstruktion des Heizbereiches zu umgehen - Zwei temperierte Bauteile im Rohrinnern (Zuleitungen) - Innenkühlung weniger effektiv	- Nur geringe Heizleistung möglich => kleine Vorschubgeschwindigkeit - Probleme mit natürlicher Konvektion und deshalb: - Ungleichmäßige Erwärmung von außen - **Dichtwirkung und Verschleiß der Schleifdichtungen** - Teure Ersatzteile (Spezialdichtung) - Außenkokille behindert Entweichen der verdrängten Luft - Weit von bisherigen Lösungsansatz entfernt - Außenkalibrierung

Tabelle 3.3 Vergleich der beiden Lösungsvarianten

Auf den ersten Blick scheinen die Vorteile der hydraulischen Aufweitung zu überwiegen. Zur Auswahl einer der beiden Varianten sind allerdings mögliche Detailprobleme bei der technischen Umsetzung zu berücksichtigen. Diese bestehen bei der mechanischen Aufweitung vor allem in der Ausführung der kontaktlosen Heizung durch Umluft oder Strahler, während bei der hydraulischen Aufweitung die Dichtungen im Innern des Kernrohres das Hauptproblem darstellen.

Im Fall der mechanischen Aufweitung kann bei den in Frage kommenden Heizverfahren kaum auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Erste Vorversuche an bewickelten Proberohren zeigten, dass vor allem durch den Einsatz einer Infrarot-Strahlerheizung hohe Energiedichten pro Fläche eingebracht und damit schnelle Aufheizzeiten erreicht werden können. Dies ist vor allem im Hinblick auf eine gewünschte möglichst hohe Vorschubgeschwindigkeit von Vorteil. Das Problem der kontaktlosen Außenheizung scheint damit lösbar.

Bei der hydraulischen Rohraufweitung sind die kritischen Bauteile die Schleifringdichtungen, die den Druckwasserbereich gegen das Kernrohr dichten. Die Dichtwirkung muss bei Drücken von deutlich über 10 bar und bei Relativbewegung des Kernrohres gewährleistet werden. Drücke im Rohrinnern, die den eigentlichen Tränkungsdruck übersteigen, sind nötigt, da der nicht aufgeschmolzene Anteil des PA-Kernrohres aufgeweitet und elastisch verformt werden muss. Der für diese Verformung benötigte Innendruck überlagert sich dem Tränkungsdruck.
Zusätzlich müssen die Schleifringdichtungen in der Lage sein, die geometrischen Abweichungen des Kernrohres auszugleichen und die Dichtung auch gegen ein exzentrisches Rohr zu gewährleisten. Dabei hängen die zu tolerierenden Schwankungen von der Präzision der Kernrohre ab.
Zusammenfassend ergeben sich folgenden Anforderungen an die Dichtungen:

- Dichten bis zu einem Innenruck von ca. 15 bar
- Temperaturbeständigkeit bis mindestens 200°C
- Variabler Dichtspalt im Bereich von ca. ± 0,4 mm
- Dichtung gegen exzentrisches Rohr
- Möglichst hohe Verschleißfestigkeit gegen kontinuierliche Bewegung des Kernrohres über die Dichtung hinweg mit einer Geschwindigkeit von max. 50mm/s

Bei einer Untersuchung weisen die gelieferten Kernrohre derart grobe geometrischen Abweichungen auf (siehe Anhang), dass für eine ausreichende Dichtwirkung eine Variation des Dichtspalts im Bereich von mehr als 2mm erforderlich wird. Die Lösung des Dichtungsproblems unter Berücksichtigung der geforderten hohen Drücke scheint aus diesem Grund nahezu unmöglich.
Da das Eindringen von Wasser in das Innere des Kernrohres auf jeden Fall vermieden werden muss, führt dieser Schwachpunkt im Lösungskonzept zum Ausscheiden der hydraulischen Aufweitung aus der weiteren Betrachtung.

Im Folgenden wird deshalb nur noch die gewählte Ausführung mit mechanischer Aufweitung und kontaktloser Außenheizung untersucht und auf die konstruktive Umsetzung eingegangen.

3.7 Gliederung der Neukonstruktion

In den folgenden Kapiteln wird auf die detaillierte Umsetzung der gewählten Lösungsvariante für das PAZ-Verfahren eingegangen.. Es soll ein temperierter, mechanischer Aufweitdorn zur Ausführung kommen, dem ein ebenfalls temperierter Kalibrierbereich nachgeschaltet ist. Die Erwärmung auf Schmelztemperatur erfolgt von außen durch eine berührungslose Heizung.
Dieses neue Konzept für die Hauptfunktionen des PAZ-Verfahrens wird in einen Gesamtablauf eingebettet, der prinzipiell demjenigen der bestehenden V.E. entspricht. Demnach soll ein Trägerrohr zur Aufnahme des Versuchsrohres vor Versuchsbeginn dienen. Die benötigten Abzugskräfte werden mit Hilfe eines Hydraulikzylinders erzeugt und über ein Stahlseil in des Versuchsrohr eingeleitet.
Es ergeben sich fünf Hauptfunktionsträger, die im Rahmen einer Neukonstruktion zu entwickeln bzw. zu überarbeiten sind. Im Einzelnen sind dies:

1. Kolben
2. Trägerrohr
3. Heizung
4. Abzugsvorrichtung
5. Wickelvorrichtung

Eine völlige Neukonstruktion erfordern der Kolben und die Heizung. Anpassungskonstruktionen müssen für die Wickelvorrichtung, das Trägerrohr und die Abzugsvorrichtung vorgenommen werden.
Wichtig ist, dass aufgrund der engen Beziehung zwischen Trägerrohr und Kolben der Aufbau des Trägerrohres an den Aufbau des Kolbens angepasst werden muss.

In den folgenden 5 Kapiteln werden die Detailkonstruktionen der Hauptfunktionsträger entsprechend der obigen Gliederung ausführlich beschrieben.
Bei der Konstruktion sämtlicher Elemente des neuen Versuchsstandes sind die in Tabelle 3.1 formulierten grundsätzlichen Anforderungen zu berücksichtigen. Sie werden zu Beginn jedes Kapitels durch spezifische Anforderungen an den jeweils besprochenen Funktionsträger ergänzt.

4 Neukonstruktion des Kolbens

4.1 Anforderungen

Die Neukonstruktion des Kolbens wird primär durch die in Tabelle 3.1 formulierten Anforderungen bestimmt. Diese werden durch weitere Anforderungen ergänzt, die die Außenkontur und die innere Struktur des Kolbens betreffen.
Es ergibt sich folgende Anforderungsliste für den Kolben:

Grundsätzliche Anforderungen	
FF	konstante Temperatur im Aufweitbereich durch leistungsfähiges Temperiergerät, Temperatur frei wählbar
FF	Variabler, modularer Aufbau des Innenbereiches, möglichst geringer Montageaufwand
W	Konstruktion muss auch für andere Geometrien anwendbar sein
FF	Geringes Kolbengewicht
Anforderungen an die Außenkontur	
FF	Zentrierung und Führung des Versuchsrohres durch den Kolben
FF	Möglichst glatter, polierter Aufweitbereich eventuell mit Beschichtung
FF	Kalibrier- bzw. Kühlbereich mit Beschichtung aus PTFE
Anforderungen an die innere Struktur des Kolbens	
FF	Aufweit- und Kalibrierbereich mit guter Wärmeleitung und hoher Festigkeit
FF	Thermische Trennung und Isolierung der verschiedenen Temperaturbereiche im Innendorn, Verwendung von Brandenburgerplatten
W	Isolationsplatte aus PEEK
W	Gleichmäßige Temperaturverteilung am Kolbenumfang
W	Dichtung durch axiale / radiale O-Ringe

Legende: FF: Festforderung
W: Wunsch

Tabelle 4.1 Anforderungen an den Kolben

Die Forderung nach geringem Kolbengewicht berücksichtigt, dass der Kolben an der Spitze eines Trägerrohres befestigt ist. Infolge seines Eigengewichtes kommt es zu einer Durchbiegung des Trägerrohres und damit zu einer Absenkung des Kolbens aus der Horizontalen. Zur Erzielung optimaler Ergebnisse muss diese Absenkung minimiert werden.

Entsprechend der Anforderungsliste gliedert sich die Neukonstruktion des Kolbens in zwei Hauptpunkte:

- Festlegung der Außenkontur des Kolbens
- Detailkonstruktion der inneren Struktur des Kolbens

4.2 Festlegung der Außenkontur

Aus der Anforderungsliste ergibt sich, dass die Außenkontur vier Funktionen zu erfüllen hat. Dies sind:

- Zentrieren des Versuchsrohres
- Führen des Versuchsrohres
- Aufweiten und Tränken
- Kalibrieren und Abkühlen

Unter Berücksichtigung der Forderung nach der thermischen Trennung des Kolbens in einen beheizten und einen gekühlten Bereich bietet sich ein zweiteiliger Aufbau der Außenkontur aus zwei zylindrischen Bauteilen an. Diese werden im folgenden als Aufweitdorn und Kalibrierzylinder bezeichnet.
Um die Forderung nach möglichst guter Wärmeleitung bei hoher Festigkeit zu erfüllen, werden Aufweitdorn und Kalibrierzylinder aus einer hochfesten Aluminiumlegierung gefertigt.
Die Funktionen Zentrieren, Führen und Aufweiten werden vom beheizten Aufweitdorn übernommen. Kühlung und Kalibrierung finden im Bereich des Kalibrierzylinders statt.

4.2.1 Aufweitdorn und Aufweitdurchmesser

a) Außenkontur des Aufweitdorns:
Zur Erfüllung seiner Aufgaben wird der Aufweitdorn in vier Bereiche unterteilt. Es ergibt sich folgende prinzipielle Struktur:

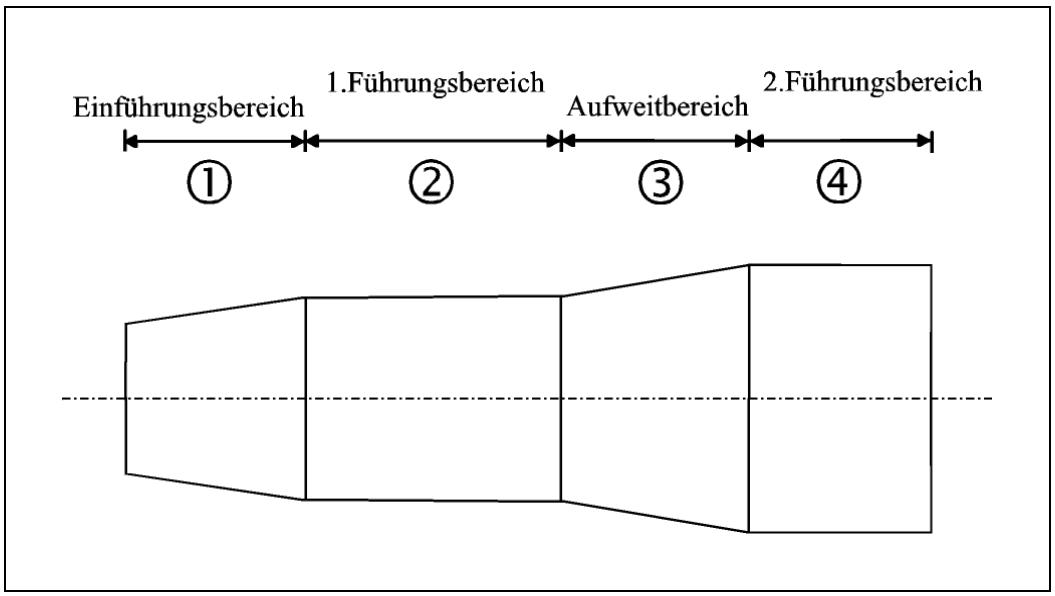


Bild 4.1 Kontur des Aufweitdorns

Die einzelnen Bereiche mit der jeweils zugehörigen Funktion sind:

- konischer Einführungsbereich (1) zur Zentrierung des Kernrohres
  In diesem Bereich wächst der Kolbendurchmesser kontinuierlich auf den Innendurchmesser des Kernrohres. Dadurch wird ein leichtes Einführen des Kolbens in das Kernrohr und gleichzeitig die Zentrierung auf dem Kolben erreicht.

- erster zylindrischer Führungsbereich (2) zur Führung und Vorwärmung des Kernrohres
  Der Kolbendurchmesser entspricht dem Innendurchmesser (Führungs-durchmesser) des Kernrohres. Das Versuchsrohr wird in diesem Bereich durch den Kolben geführt. Die Länge des Führungsbereiches wird über die Aufheizgeschwindigkeit bestimmt.

- konischer Aufweitbereich (3) zur Aufweitung des Kernrohres und Tränkung der GF-Wicklung
  Der Kolbendruchmesser wächst kontinuierlich auf den Aufweitdurchmesser, der nötig ist, den erforderlichen Tränkungsdruck aufzubauen und Matrix durch die Wicklung nach außen zu drücken. Der Aufweitdurchmesser ist für die Funktion des PAZ-Verfahrens die entscheidende geometrische Größe. Er muss so genau wie möglich berechnet werden. Die Steigung bzw. der Winkel im Aufweitbereich liegt über die Differenz zwischen Führungsdurchmesser und Aufweitdurchmesser die Länge des Aufweitbereiches fest.

- Der zweite zylindrische Führungsbereich (4)
  Der Durchmesser entspricht dem Aufweitdurchmesser. In diesem Bereich wird der Tränkungsvorgang abgeschlossen.

b) Berechnung des Aufweitdurchmessers:

Für die Berechnung der Aufweitung wird von einem trocken bewickelten Kernrohr ausgegangen, auf dem drei Schichten aus Hybridfasern abgelegt werden. Direkt auf dem Kernrohr liegt ein AWV mit $\omega = \pm 10$ °, gefolgt von einem AWV mit $\omega = \pm 60$ °. Der AWV mit $\omega = \pm 10$ ° wird für die Rechnung als eine einzelne 0° Schicht betrachtet.
Bei der Berechnung des Aufweitdurchmessers wird folgender Rechenweg verfolgt:

1. Berechnung der Aufweitung der Hybridwicklung nach Netztheorie [13] unter Berücksichtigung:
   - Des zur Tränkung erforderlichen Innendrucks von 10bar
   - Der Axialzugkraft

2. Berechnung der Temperaturdehnung der GF-Wicklung

3. Berechnung der Spannungen bzw. Dehnungen im Kernrohr unter Berücksichtigung:
   - Des zur Tränkung erforderlichen Innendrucks von 10bar
   - Der zuvor berechneten Aufweitung der Wicklung

4. Berechnung der zusätzlich erforderlichen Aufweitung und der erforderlichen Aufschmelztiefe, um die äußere 60°-Schicht vollständig mit Matrix durchtränken zu können. Folgende Punkte werden berücksichtigt:
   - Luft in der 0° -Schicht bereits vollständig verdrängt
   - Nur die inneren Glasfasern der 60° Schichten werden durch den Innendruck belastet. Nur diese Schichten werden kompaktiert.
   - Der Außenradius der Wicklung wird als konstant angenommen.

Diese vier Anteile werden zur Gesamtaufweitung aufsummiert. Es fällt auf, dass der Anteil der Aufweitung für die vollständige Tränkung der äußeren 60° Schichten mehr als 50 % an der Gesamtaufweitung beträgt.
Außerdem zeigt die Rechnung, daß an der Außenseite der Wicklung eine Schicht verbleibt, die unter den 10 bar Tränkungsdruck nicht kompaktiert wird. Die Fasern in diesem Bereich werden beim Tränkungsvorgang nur durch den Strömungswiderstand der Wicklung unter Spannung gehalten. Der Qualität des Laminates an der Außenseite muss daher besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.
Der detaillierte Gang der Rechnung kann dem Anhang entnommen werden. Zusätzlich wurde die Berechnung des Aufweitdurchmessers in einer Exceldatei (Gesamtberechnung.xls) abgelegt und mit einer leicht verständlichen Eingabemaske versehen. Damit können Parameter in kürzester Zeit geändert und entsprechend ausgewertet werden.

4.2.2 Kalibrierzylinder und Schrumpfdurchmesser

Außenkontur des Kalibrierzylinders:

Der Kalibrierzylinder soll die Funktionen der Kühlung und der Kalibrierung erfüllen. Er ist in zwei Bereiche aufgeteilt:

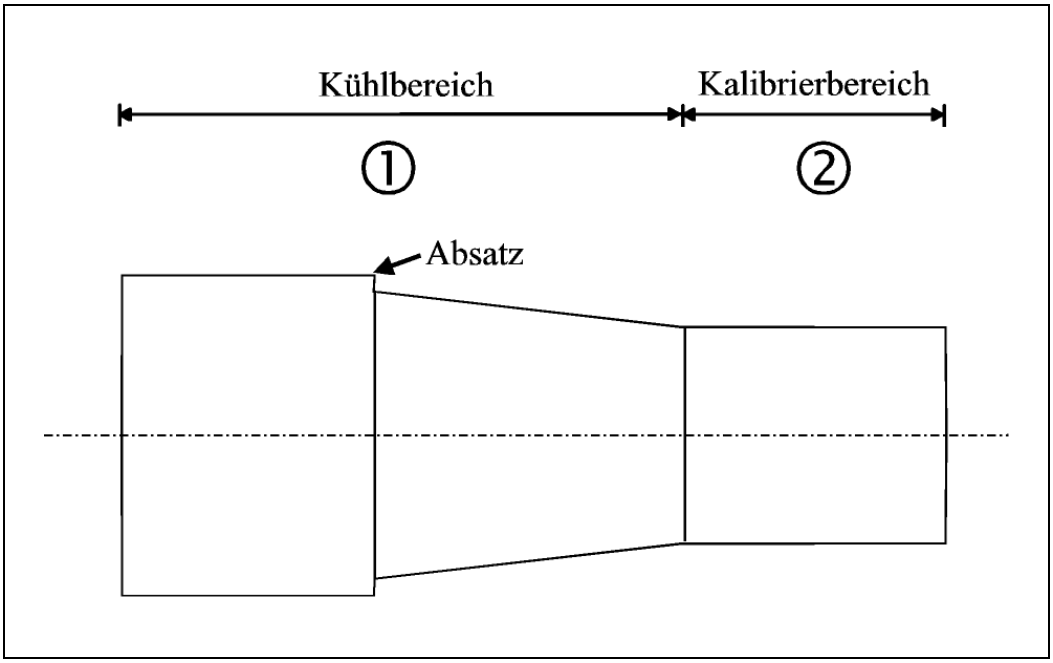


Bild 4.2 Kontur des Kalibrierzylinders

Die Bereiche mit den jeweiligen Funktionen sind:

- Bereich zur Innenkühlung des Kernrohres (1)
  Dieser Bereich setzt sich aus zwei Abschnitten zusammen. Der erste Abschnitt ist zylindrisch und der Durchmesser entspricht dem Aufweitdurchmesser des Aufweitdornes. Dabei wird kontinuierlich Wärme an der Rohrinnenseite entzogen.
  Der Übergang zum zweiten Abschnitt ist durch einen Durchmessersprung gekennzeichnet. Durch die sprunghafte Reduzierung des Durchmessers auf den zu erwartenden Innendurchmesser nach der Erstarrung sämtlicher Matrix soll ein Aufschrumpfen des Verbundrohres auf den Kalibrierzylinder verhindert werden. Die Berechnung des durch den Schrumpf reduzierten Durchmessers erfolgt in der Schrumpfrechnung (s.u.).
  Der zweite Abschnitt im Kühlbereich verläuft konisch und dient dazu, ein Aufschrumpfen des Rohres während des weiteren Abkühlvorganges zu verhindern.

- Bereich der Kalibrierung (2)
  Der zylindrische Kalibrierbereich verleiht dem Verbundrohr zum Ende des Fertigungsprozesses einen definierten Innendurchmesser.

Berechnung des Schrumpfdurchmessers:

Die Berechnung des durch Schrumpf reduzierten Durchmessers stützt sich auf die Grundlagen aus [13].

Folgende Annahmen werden bei der Berechnung getroffen:

- Durch das Aufschmelzen des aufgeweiteten PA-Rohres relaxieren die gedehnten Glasfasern, so dass in der Rechnung für den Verbund keine mechanischen Dehnungen bzw. Spannungen zu berücksichtigen sind.
- Ein Verbund liegt erst vor, wenn die Erstarrungstemperatur der PA-Matrix unterschritten wird. Dies ist bei ca. 200°C der Fall. Somit wird zunächst die temperaturbedingte Kontraktion der Glasfasern zwischen der Austrittstemperatur aus der Heizung von ca. 250 °C und der Erstarrung zum Verbund berechnet.
- Es wird unterhalb der Erstarrungstemperatur von einem vierschichtigen Verbund ausgegangen, dessen innere Schicht nur aus Matrix (nicht aufgeschmolzener Rest des PA- Kernrohres) besteht.

Auch die Berechnung des Schrumpfes wurde in der Exceldatei (Gesamtberechnung.xls) mit eingebaut.

4.3 Detailkonstruktion der inneren Struktur des Kolbens

Die Detailkonstruktion der inneren Struktur des Kolbens wird von der Forderung nach einem modularen Aufbau bestimmt. Dadurch soll der schnelle und einfache Austausch einzelner Komponenten ermöglicht werden. Ebenfalls bei der Konstruktion des Kolbens ist der Einsatz des PAZ-Verfahrens im Rahmen einer kontinuierlichen Fertigung zu berücksichtigen.
Der grundsätzliche Aufbau des Kolbens wird von der Position an der Spitze des Trägerrohres und der thermischen Zweiteilung bestimmt. Analog zur Umsetzung in der bestehenden V.E. baut der Kolben auf einer Universalaufnahme (Trägerplatte) auf. Diese ist in das Trägerrohr eingeklebt und stellt damit die Schnittstelle zwischen Kolben und Trägerrohr dar. Im Folgenden wird sie zum Kolben gerechnet, obwohl sie fest mit dem Trägerrohr verbunden ist.
An die Trägerplatte schließt sich der beheizte Führungs- bzw. Aufweitbereich an. Seine Außenkontur wird durch den Aufweitdorn bestimmt. Es folgt eine Isolationsplatte zur thermischen Trennung. Den Abschluss bildet der gekühlte Kalibrierbereich, in dem die Außenkontur durch den Kalibrierzylinder vorgegeben wird.

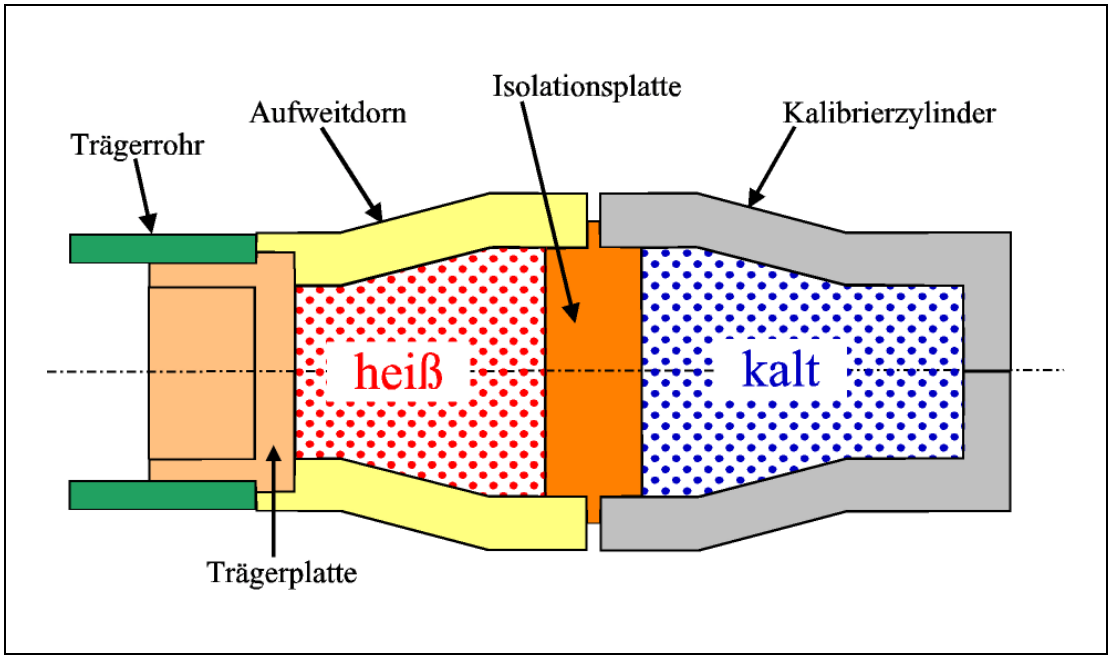


Bild 4.3 Grundstruktur des Kolbens

Im Rahmen dieser Grundstruktur muss das Hauptaugenmerk bei der Gestaltung der inneren Struktur des Kobens auf zwei Funktionen gelegt werden:

- Gestaltung des Kraftflusses im Kolben
- Gestaltung der Zu- und Abflüsse für Heiz- bzw. Kühlmedien sowie des Strömungsverlaufes im Kolbeninnern

4.3.1 Gestaltung des Kraftflusses

Während des Versuches müssen die am Kolben angreifenden Abzugskräfte in die Trägerplatte und damit in das Trägerrohr eingeleitet werden. Unter Berücksichtigung eines modularen Aufbaus ergeben sich für die Leitung dieser Kräfte durch den Kolben zwei Möglichkeiten:

- Kraftfluß durch direkte Verschraubung der Bauteile, die die Außenkontur des Kolbens bestimmen
- Leitung der Kräfte durch Zuganker (Bild 4.6 und 4.5) im Kolbeninnern

Ein Vergleich der beiden Varianten weist folgende Vor- und Nachteile aus:

	Direkte Verschraubung	Zuganker
Vorteile	+ Weniger Teile + Weniger Dichtungen + Längenänderung durch einfachen Austausch der Komponenten möglich	+ Klare Funktionstrennung (Kraftfluß, Zentrierung) + Einfache Teile + Einsatz im kontinuierlichem PAZ-Verfahren möglich
Nachteile	- kompliziertere Teile - Festigkeitsprobleme - Umsetzung der kontinuierlichen Fertigung schwierig	- zusätzliche Dichtungen - Längenänderungen des Kolbens erfordern neue Zuganker

Tabelle 4.2 Vergleich zwischen direkter Verschraubung und dem Einsatz von Zugankern

Hauptschwachpunkt der direkten Verschraubung ist die Festigkeit der Verbindung zwischen Aufweitdorn und Isolationsplatte bzw. zwischen Kalibrierzylinder und Isolationsplatte. Für eine gute thermische Isolation muss die Isolationsplatte aus Kunststoff gefertigt werden, so dass sich an den genannten Stellen eine Gewindepaarung Metall-Kunststoff ergibt. Vor allem bei den geforderten hohen Temperaturen von bis zu 150 °C ist die Festigkeit der Verbindung nicht gewährleistet.
Zusätzlich wird die Variante mit direkter Verschraubung der Forderung nach der möglichen Realisierung einer kontinuierlichen Fertigung nicht gerecht. Dazu müssten sich alle Anschlüsse für die Zu- und Abläufe der Heiz-, bzw. Kühlmedien am Kolben auf der Seite des Trägerrohres befinden. Das Kühlmedium müsste durch den Heizbereich geleitet werden. Hierzu gibt es bei der direkten Verschraubung keine Möglichkeit. Bei der Variante mit Zugankern im Innern dagegen, können diese rohrförmig ausgeführt werden. Die Leitung des Kühlwassers durch den Heizbereich kann dann im Innern der Zuganker erfolgen.
Die Entscheidung fällt deshalb zugunsten der Variante mit Zugankern im Kolbeninnern. Es ergeben sich zwei Möglichkeiten der Ausführung:

- Zentraler Zuganker in der Kolbenmitte
- Drei Zuganker um 120° versetzt

Drei Zuganker ermöglichen eine bessere Zentrierung sowie eine gleichmäßigere Kraftverteilung über den Umfang. Außerdem ergeben sich Vorteile hinsichtlich des Strömungsverlaufes im Kolbeninnern.

⇨ Realisierung eines Kolbens mit drei innenliegenden, um 120 ° versetzten Zugankern

4.3.2 Strömungsverlauf im Kolben

Einer der Nachteile bei der mechanischen Aufweitung ist, dass ein Werkzeug mit zwei temperierten Bereichen im Innern des Versuchsrohres zum Einsatz kommt. Für jeden Bereich werden Zu- und Ableitungen benötigt. Bei der Gestaltung der Zu- und Abläufe von Heiz- und Kühlmittel am Kolben sind zwei Punkte zu beachten:

- Berücksichtigung einer kontinuierlichen Fertigung
- gleichmäßige Temperaturverteilung über dem Kolbenumfang

Für eine kontinuierliche Fertigung müssen alle Zu- und Ableitungen auf der Seite des Trägerrohres angeschlossen und die Leitungen im Innern des Trägerrohres zum Kolben geführt werden. Prinzipiell ist eine solche Konstruktion durch die Verwendung von rohrförmigen Zugankern im Kolbeninnern möglich, da das Kühlmittel im Innern der Zuganker zum Kalibrierzylinder geleitet werden kann. Ein solcher Aufbau wäre aber für einen Versuchsstand, bei dem speziell die optimalen Parameter für das Verfahren geklärt werden sollen, zu aufwendig und zu teuer.
Es werden deshalb im neuen Versuchsstand nur die Heizleitungen durch das Innere des Trägerrohres geführt. Die Leitungen für das Kühlwasser werden an der freien Seite des Kolbens angeschlossen. Sie müssen nach jedem Versuch zur Entnahme des fertigen Verbundrohres demontiert werden.
Sämtliche Anschlüsse, Rohre und Schläuche werden aus der Produktpalette der Firma Ermeto gewählt.

Eine gleichmäßige Temperatur über den Kolbenumfang erfordert einen symmetrischen Strömungsverlauf im Kolbeninnern. Dazu wird auf jeder Seite eine zentrale Zuleitung mit zwei Abflüssen kombiniert, die rechts und links von der Zuleitung liegen. Im Kolbeninnern wird das Wasser in den beiden Kammern durch eine Düse bis in die Nähe der Isolationsplatte geleitet. Dort wird es radial nach außen umgelenkt und strömt an der Innenseite von Aufweitdorn bzw. Kalibrierzylinder zurück zu den Abflüssen. Ein Längsschnitt durch den Kolben zeigt in der Ansicht von oben folgenden Strömungsverlauf:

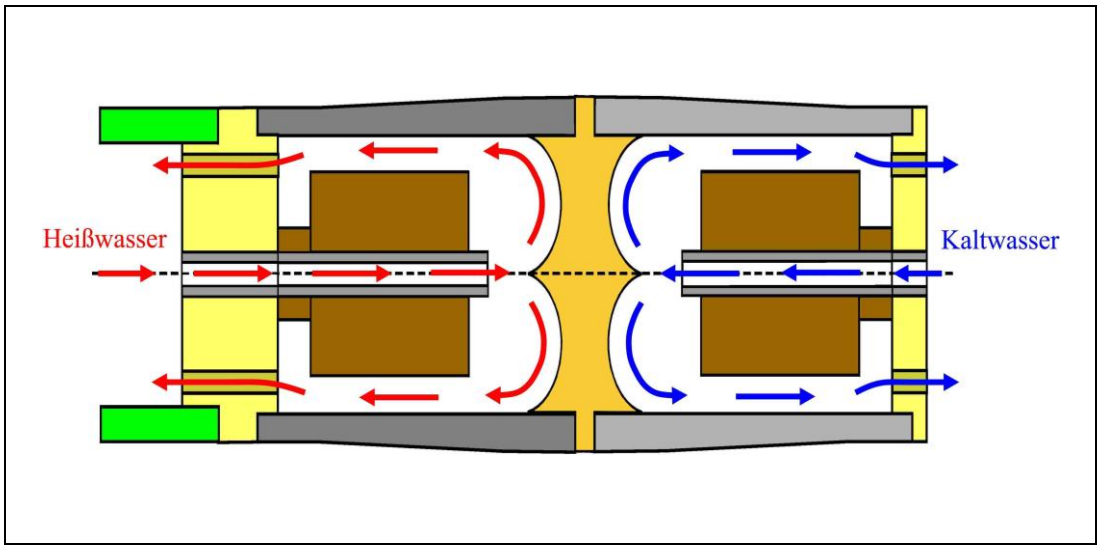


Bild 4.4 Strömungsverlauf im Kolbeninnern (Zuganker nicht dargestellt)

4.4 Gesamtaufbau des Kolbens

Aus diesen Überlegungen ergibt sich folgender Gesamtaufbau des Kolbens:

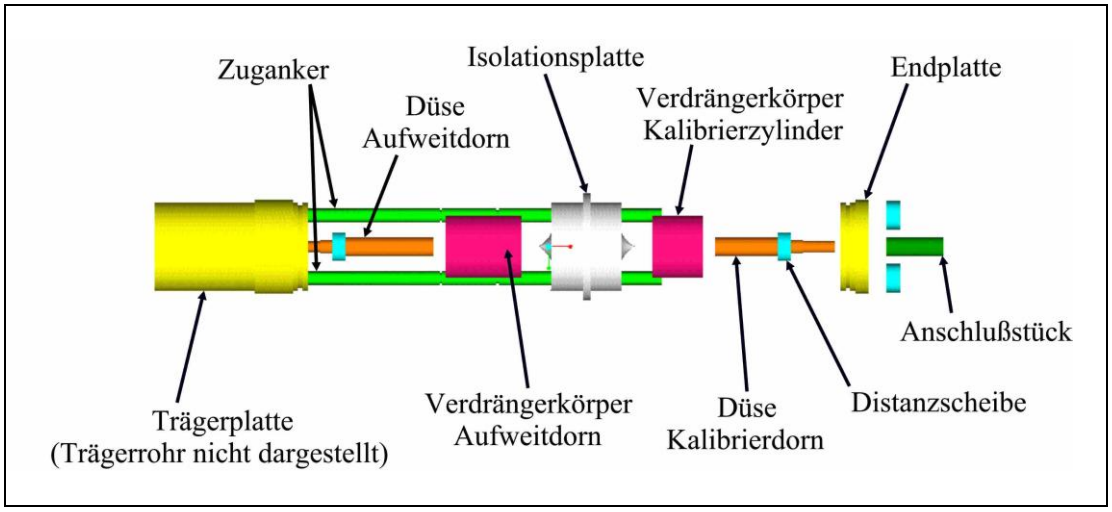


Bild 4.5 Explosionsdarstellung des Kolbens (Aufweitdorn und Kalibrierzylinder nicht dargestellt)

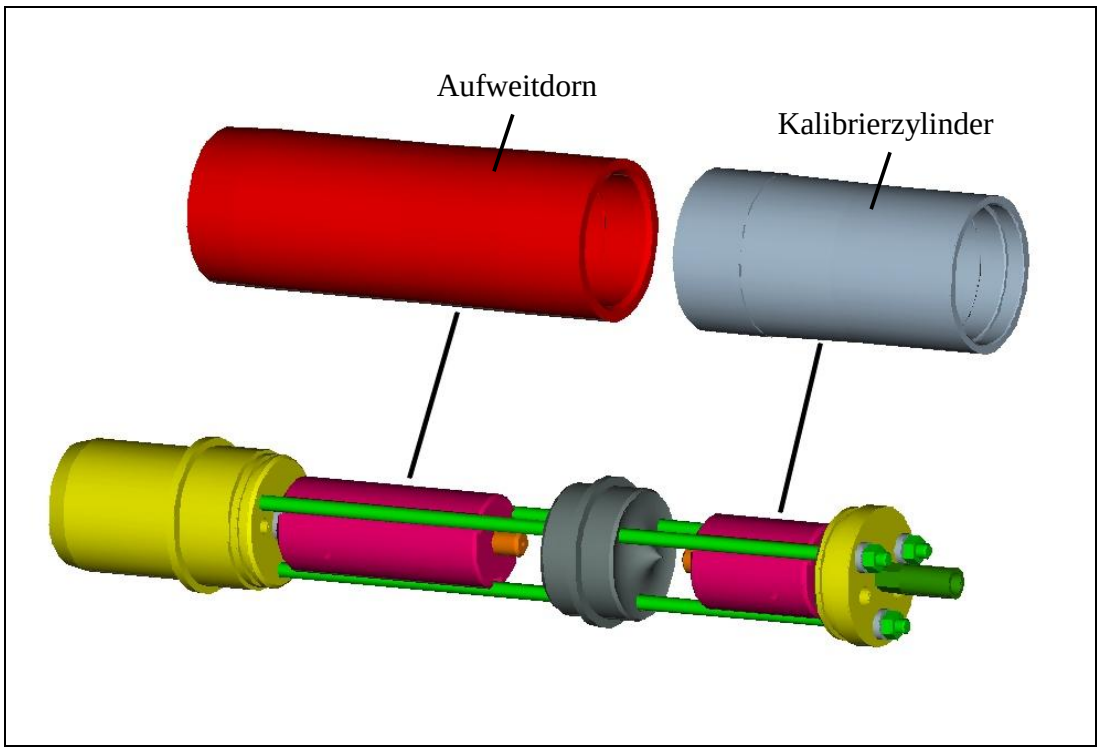


Bild 4.6 3-D-Ansicht des Kolbens mit Aufweitdorn und Kalibrierzylinder

Im Detail haben die einzelnen Teile folgenden Aufbau:

a) Trägerplatte

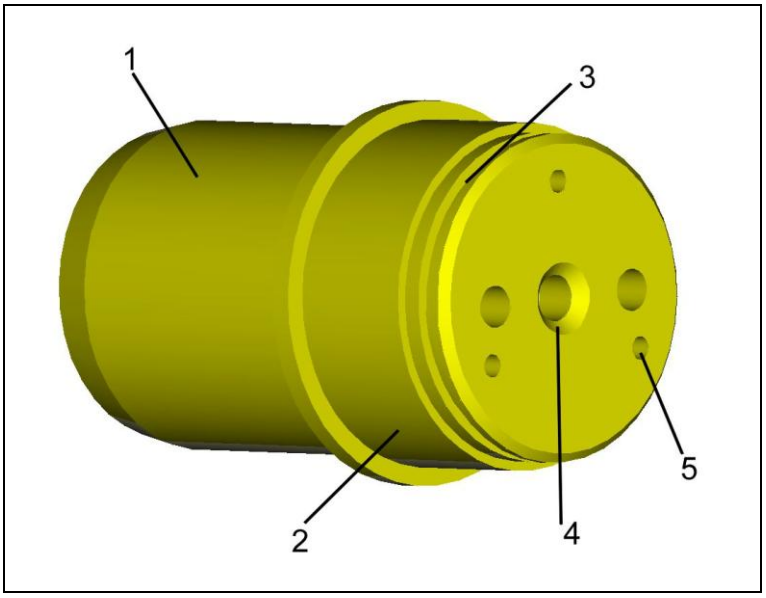


Bild 4.7 Trägerplatte

Die Trägerplatte ist in das Trägerrohr eingeklebt. Die Klebefläche (1) ist ausreichend groß, um die Zugkräfte über Schub in das Trägerrohr einzuleiten.
An die Klebefläche schließt sich eine Passfläche (2) zur Zentrierung des Aufweitdorns und eine Dichtfläche (3) mit radialem O-Ring an.
Im Innern der Trägerplatte verlaufen die Zu- und Abführungen für das temperierte Wasser. In die Zuführung (4) wird auf der freien Seite der Trägerplatte die Düse zur Weiterleitung des Wassers eingeschraubt. Ihr Gewinde wird durch einen O-Ring in Dreiecknut gedichtet.
Ebenfalls auf der freien Seite befinden sich die radial versetzten Gewinde (5) für die Zuganker.

b) Düsen

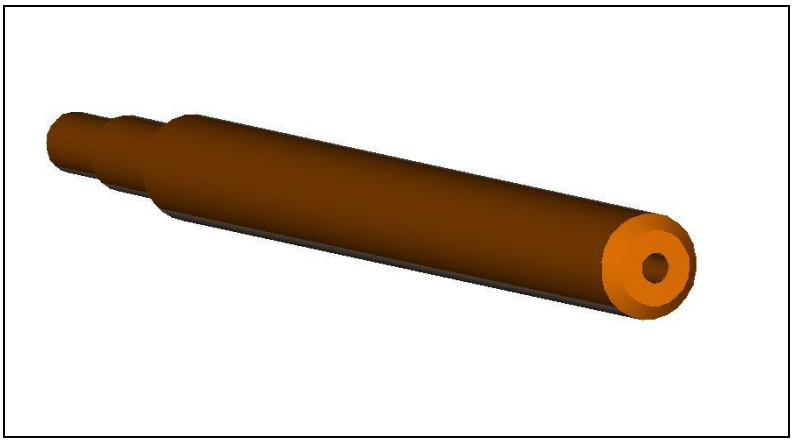


Bild 4.8 Düse Aufweitbereich

-

Die beiden Düsen liegen im Innern des Heiz- bzw. des Kühlbereiches. Sie werden in die Träger- bzw. Endplatte eingeschraubt und leiten das Wasser zur Isolationsplatte.

c) Verdränger

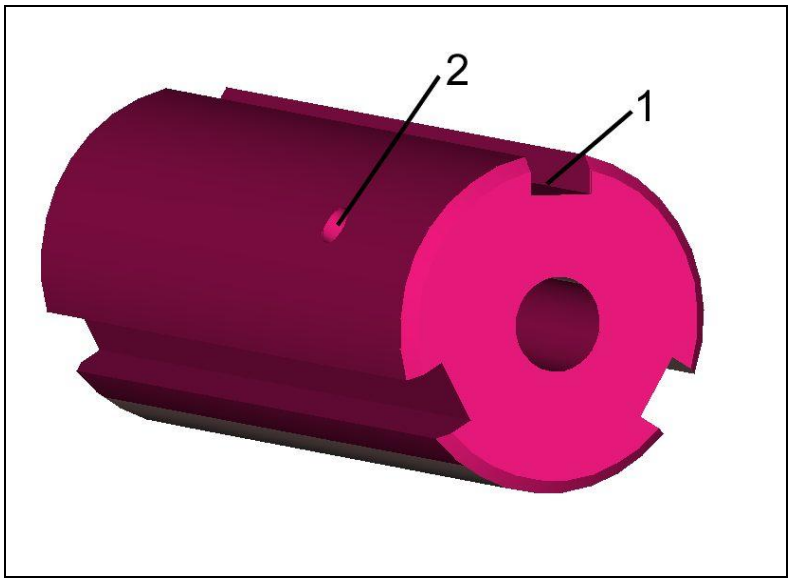


Bild 4.9 Verdränger Aufweitbereich

Die Verdränger bestehen aus Kunststoff und sitzen auf den Düsen. Der Abstand zur Träger- bzw. Endplatte wird über zwei Distanzscheiben eingestellt.
Die Verdränger dienen dazu, das Wasservolumen im Innern der beiden Kammern zu verringern und die Strömung im Kolbeninnern zu leiten. An ihrer Außenseite befinden sich jeweils drei Nuten (1), in denen die Zuganker verlaufen. Die Verdränger werden mit einer Madenschraube (2) auf den Düsen fixiert.

d) Isolationsplatte

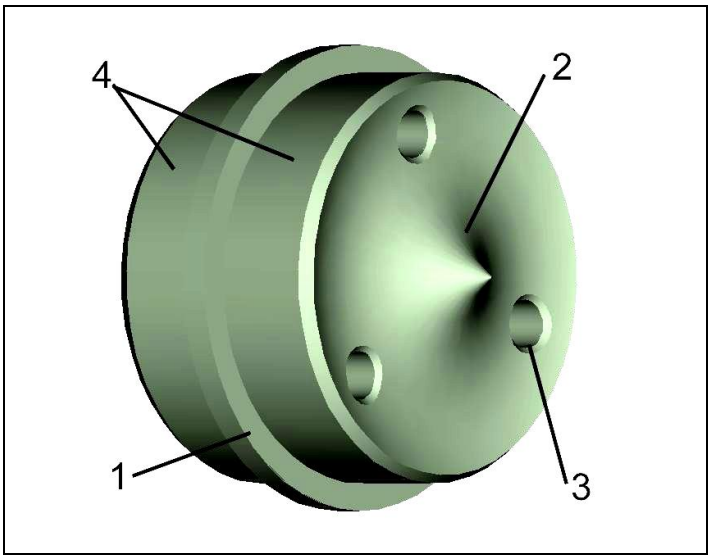


Bild 4.10 Isolationsplatte

Die Isolationsplatte ist aus Kunststoff gefertigt und erfüllt zwei Aufgaben:

- thermische Isolation zwischen Aufweit- und Kalibrierbereich
  Um die Isolation auch im äußeren Bereich des Kolbens zu gewährleisten, ragt in der Mitte der Isolationsplatte ein Bund (1) zwischen Aufweitdorn und Kalibrierzylinder. Damit die Isolationsplatte nicht das Innere des Kernrohres berührt, verschwindet der Bund bei der Montage in einer Nut im Kalibrierzylinder. Im Bereich bis zur Kolbenoberfläche wird die thermische Trennung zwischen Aufweitdorn und Kalibrierzylinder durch einen dünnen Luftspalt mit einer Breite von ca. 0,5 mm aufrecht erhalten.

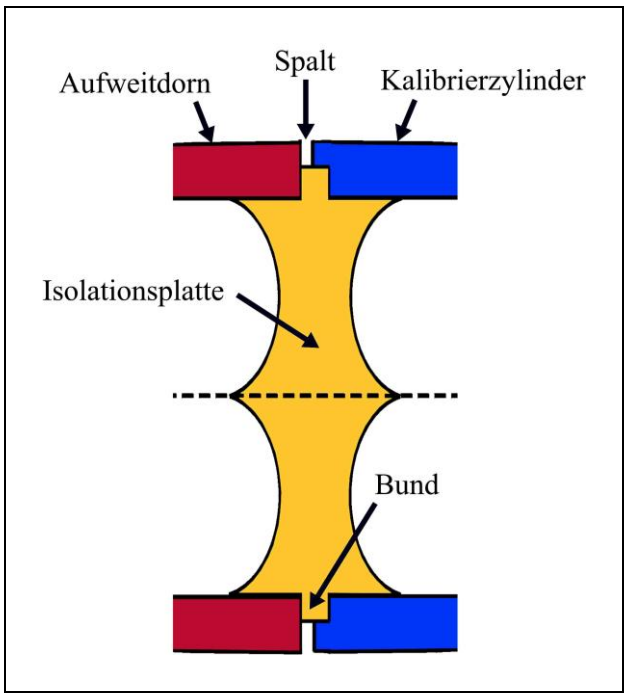


Bild 4.11 Prinzip der thermischen Trennung

- radiales Umlenken der Strömung in den Kammern
  Dazu sind die als Prallplatte für die Strömung dienenden Seitenflächen (2) der Isolationsplatte kegelig ausgeführt. Das Wasser tritt aus den Düsen aus, prallt auf die Isolationsplatte und wird durch die Kegel radial nach außen umgelenkt.

Im Innern der Isolationsplatte befinden sich drei Bohrungen (3), durch die die Zuganker treten. Außen liegen Passflächen (4) über die die Isolationsplatte in Aufweitdorn und Kalibrierzylinder zentriert wird.

e) Endplatte

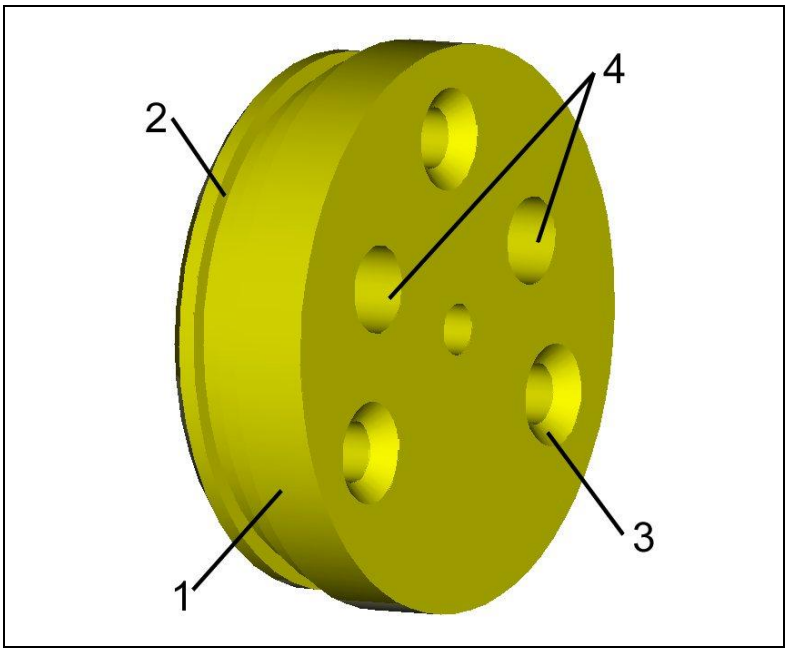


Bild 4.12 Endplatte

Die Endplatte verschließt den Kolben an seiner freien Seite. Außen liegen eine Paßfläche (1) zur Zentrierung im Kalibrierzylinder und eine Dichtfläche (2) mit radialem O-Ring. Durch die Endplatte treten die Zuganker. Die Dichtung an den Durchtrittsstellen der Zuganker erfolgt durch O-Ringe in Dreiecknuten (3). In die Endplatte eingeschraubt ist die Düse im Innern des Kalibrierzylinders. Zu erkennen sind außerdem die Abläufe für das Kühlwasser (4).

f) Zuganker

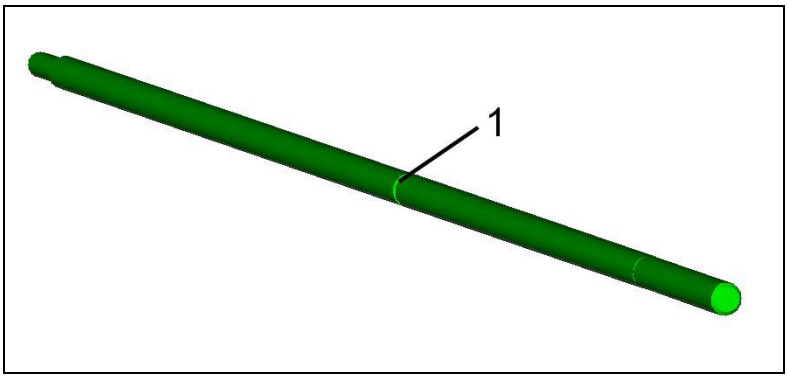


Bild 4.13 Zuganker

Die Zuganker verspannen den Kolben. Sie sind in die Trägeplatte eingeschraubt. In der Mitte befindet sich eine Nut (1) , in der ein O-Ring zur Dichtung gegen die Isolationsplatte liegt.

g) Aufweitdorn

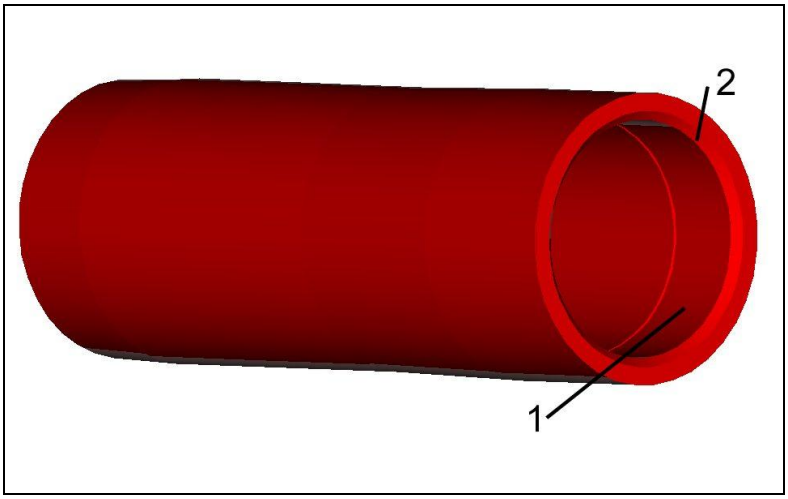


Bild 4.14 Aufweitdorn

Der Aufweitdorn weist die bekannte Außenkontur auf. Im Innern liegen zwei Passflächen (1), die ihn auf der Trägerplatte und der Isolationsplatte zentrieren. Die Dichtung zur Isolationsplatte erfolgt durch einen O-Ring in Dreiecksnut (2). Aufgrund der geforderten guten Wärmeleitung bei hoher Festigkeit ist der Aufweitdorn aus hochfestem Aluminium gefertigt.

h) Kalibrierzylinder

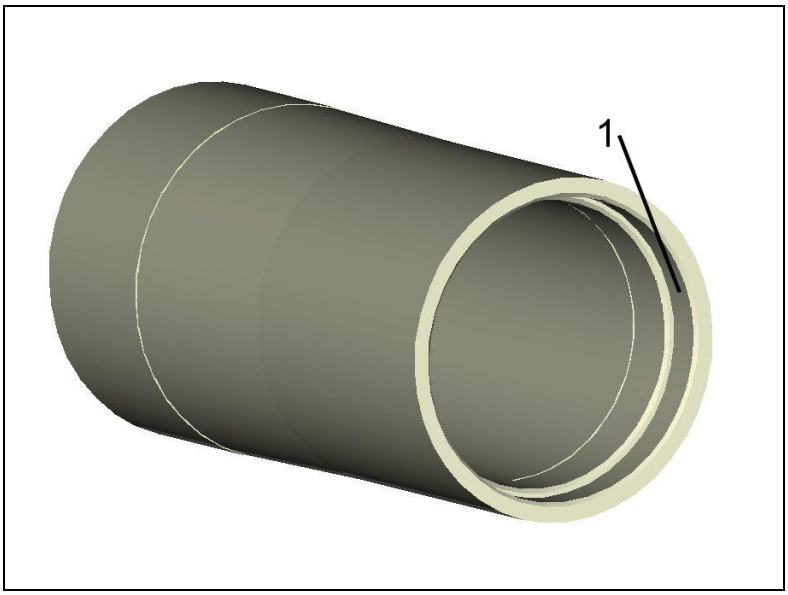


Bild 4.15 Kalibrierzylinder

Die Außendurchmesser des Kalibrierzylinders entsprechen denen, die in Aufweit- bzw. Schrumpfrechnung ermittelt wurden. Auch der Kalibrierzylinder ist für eine gute Wärmeleitung aus Aluminium gefertigt. Innen liegen Passflächen zur Zentrierung auf der Isolations- und der Endplatte (1). Die Dichtung zur Isolationsplatte entspricht der beim Aufweitdorn.

Im montierten Zustand hat der Kolben folgendes Aussehen:

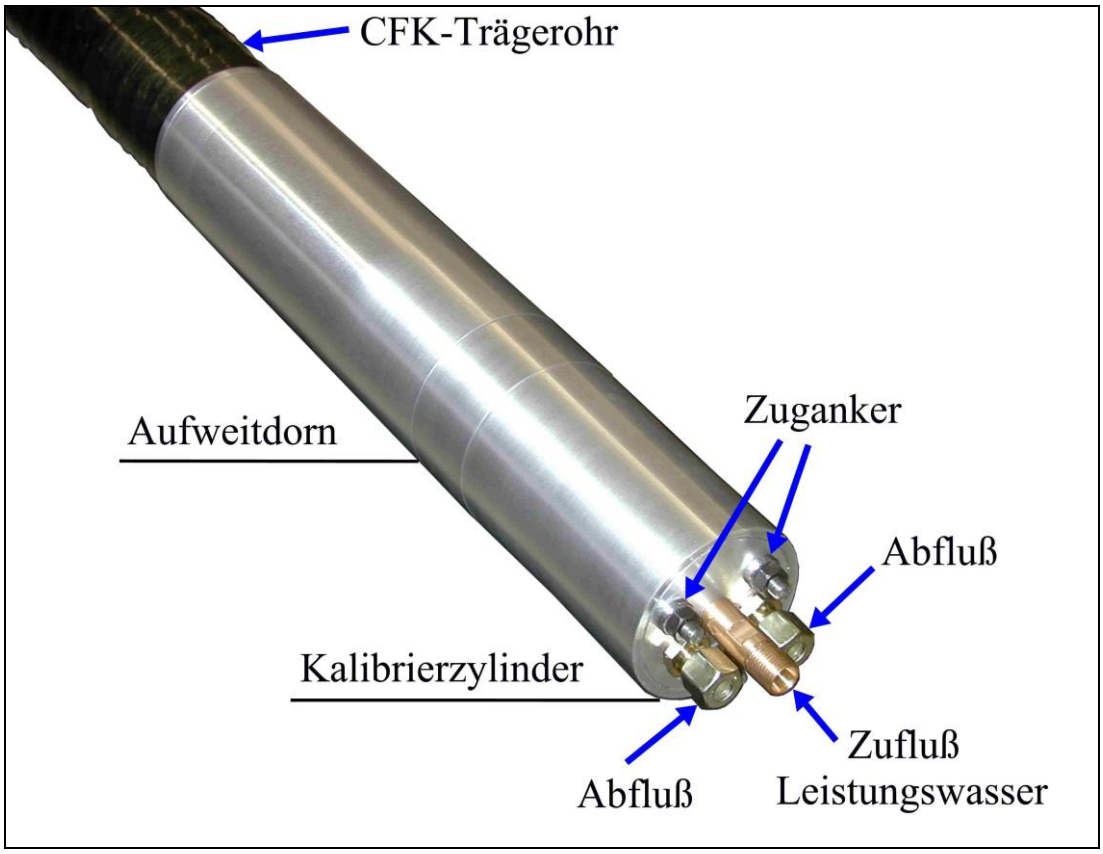


Bild 4.16 Kolben im montierten Zustand

4.5 Temperatureinstellung am Kolben

Aufweit- und Kalibrierbereich am Kolben sind temperiert.
Der Kühlbereich wird von Leitungswasser konstanter Temperatur durchströmt. Eine Regelung der Temperatur ist daher nur in begrenztem Umfang über eine Regulierung des Volumenstromes des Kühlwassers möglich.

Für den Aufweitbereich muss berücksichtigt werden, dass bei konstanter Heizleistung des Hochdruckreinigers die Temperatur des gelieferten Druckwassers von der Durchflußmenge abhängt.
Über ein System aus zwei Drosseln, von denen sich die eine in der Zuführung vor dem Kolben und die andere im Abfluß hinter dem Kolben befindet, kann der Durchfluß durch den Hochdruckreiniger reguliert werden. Damit kann die Temperatur im Aufweitbereich zwischen ca. 30°C und 140°C frei gewählt werden. Bei Temperaturen von über 100°C muss darauf geachtet werden, dass der Druck im Kolbeninnern über dem zugeordneten Dampfdruck liegt.

5 Neukonstruktion des Trägerrohres

5.1 Aufgaben und Anforderungen

Das Trägerrohr fixiert den Kolben in der für den Versuchsablauf erforderlichen horizontalen Position. Auf der einen Seite befindet sich die Trägerplatte zur Aufnahme de Kolbens, auf der anderen Seite ist das Trägerrohr mit einer massiven Grundplatte verschraubt.
Daraus ergeben sich die folgenden Aufgaben des Trägerrohres:

- Befestigung des Kolbens
  Bei der Befestigung des Kolbens ist zu beachten, dass für eine optimale Funktion des Versuchsstandes der Kolben in exakt horizontaler Position ausgerichtet wird. Ansonsten kommt es zu einer Krümmung des Versuchsrohres im Versuchsverlauf. Um eine Absenkung des Kolbens infolge seines Eigengewichtes zu verhindern, ist eine möglichst hohe Biegesteifigkeit des Trägerrohres erforderlich.
  Ebenfalls zu beachten ist, dass aufgrund der Verbindung zwischen Kolben und Trägerrohr der Aufbau des Trägerrohres auf den des Kolbens abzustimmen ist. Insbesondere ergibt sich aus dem Aufbau des Kolbens, dass die Zu- und Ableitungen, in denen temperierter Wasser zum Aufweitdorn geleitet wird, durch das Innere des Trägerrohres verlaufen müssen.

- Leiten der Abzugkräfte vom Kolben zur Halterung
  Dazu ist eine ausreichende axiale Festigkeit des Trägerrohres erforderlich.

- Aufnahme des Versuchsrohres vor Versuchsbeginn
  Das Trägerrohr dient der Aufnahme des Versuchsrohres vor Versuchsbeginn. Die Länge des Trägerrohres bestimmt damit die maximal mögliche Versuchsrohrlänge und muss deshalb möglichst groß sein. Andererseits erhöht sich mit steigender Länge die Absenkung, die durch das Eigengewicht des Kolbens hervorgerufen wird.
  Zu berücksichtigen ist außerdem, dass das Trägerrohr nach jedem Versuch zur Aufnahme eines neuen Versuchsrohres aus der Halterung demontiert werden muss. Montage und Demontage müssen daher möglichst einfach sein.

Zusammengefasst ergeben sich folgende Anforderungen an das Trägerrohr:

- hohe Biegesteifigkeit
  ⇨ möglichst geringe Absenkung des Kolbens
- Leiten des temperierten Wassers zum Aufweitdorn
- Ausreichende axiale Festigkeit
- große Länge
- Einfache Montage

5.2 Detailkonstruktion Trägerrohr

Der grundsätzliche Aufbau des Trägerrohres entspricht dem der bestehenden Versuchseinrichtung. Es ergibt sich ein dreiteiliger Aufbau aus:

- Verankerung,
- Eigentlichem Trägerrohr
- Trägerplatte

Die Verankerung dient der Befestigung des Trägerrohres in einer entsprechenden Halterung. Bei der Halterung handelt es sich um einen Stahlwinkel, der aus der bestehenden V.E. übernommen werden kann. Die Verankerung muss an diesen Winkel angepaßt werden und wird mit Hilfe einer vorhandenen Mutter der Größe M 58 in der Halterung fixiert. Montage und Demontage des Trägerrohres sind damit auf das Lösen bzw. Anziehen der Mutter beschränkt.

Das eigentliche Trägerrohr wird in CFK ausgeführt und seine Länge mit 1300 mm festgelegt. Um eine möglichst hohe Biegesteifigkeit zu erzielen, wird ein AWV mit $\omega = \pm 10°$ gewählt, der gleichzeitig eine ausreichende axiale Festigkeit garantiert.
Die Trägerplatte hat die bei der Konstruktion des Kolbens beschriebene Struktur.

Verankerung und Trägerplatte werden in das CFK-Trägerrohr eingeklebt. Um den Innendruck, der durch das Einpressen von Verankerung und Trägerplatte entsteht, aufzunehmen, ist das CFK-Rohr im Anfangs- und Endbereich durch eine 0°-Umfangswicklung verstärkt.

Für den inneren Aufbau des Trägerrohres müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Leiten des temperierten Wassers
  Die Leitung des temperierten Wassers zum Aufweitdorn kann nur im Innern des CFK-Trägerrohres erfolgen. Dazu werden Edelstahlrohre der Firma Ermeto verwendet, die in die Rückseite der Trägerplatte eingeschraubt werden. Sie verlaufen durch das Trägerrohr und treten durch entsprechende Bohrungen in der Verankerung nach außen, wo der Anschluß von entsprechenden Hochdruckschläuchen erfolgen kann.

- Kompensation der Absenkung
  Durch die große Länge des Trägerrohres von 1300mm kommt es trotz der hohen Steifigkeit des CFK-Rohres zu einer kritischen Absenkung des Kolbens aufgrund seines Eigengewichtes. Diese Absenkung muss kompensiert werden.
  Dazu wird in das Innere des Trägerrohres ein Zuganker eingebracht, der oberhalb der Rohrachse verläuft. Der Zuganker ist mit der Trägerplatte verschraubt und tritt durch eine Bohrung in der Verankerung, so dass Trägerplatte und Verankerung über den Zuganker verspannt werden können.
  Wird der Zuganker unter Spannung gesetzt, wird das Trägerrohr mit einem Biegemoment beaufschlagt, das dem Biegemoment, welches durch das Kolbengewicht hervorgerufen wird, entgegen wirkt. Der Kolben wird angehoben. Durch Erhöhung der Spannung im Zuganker kann der Kolben solange angehoben werden, bis die Absenkung durch das Eigengewicht gerade kompensiert ist und er exakt in der Horizontalen steht.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich folgender innerer Aufbau des Trägerrohres:

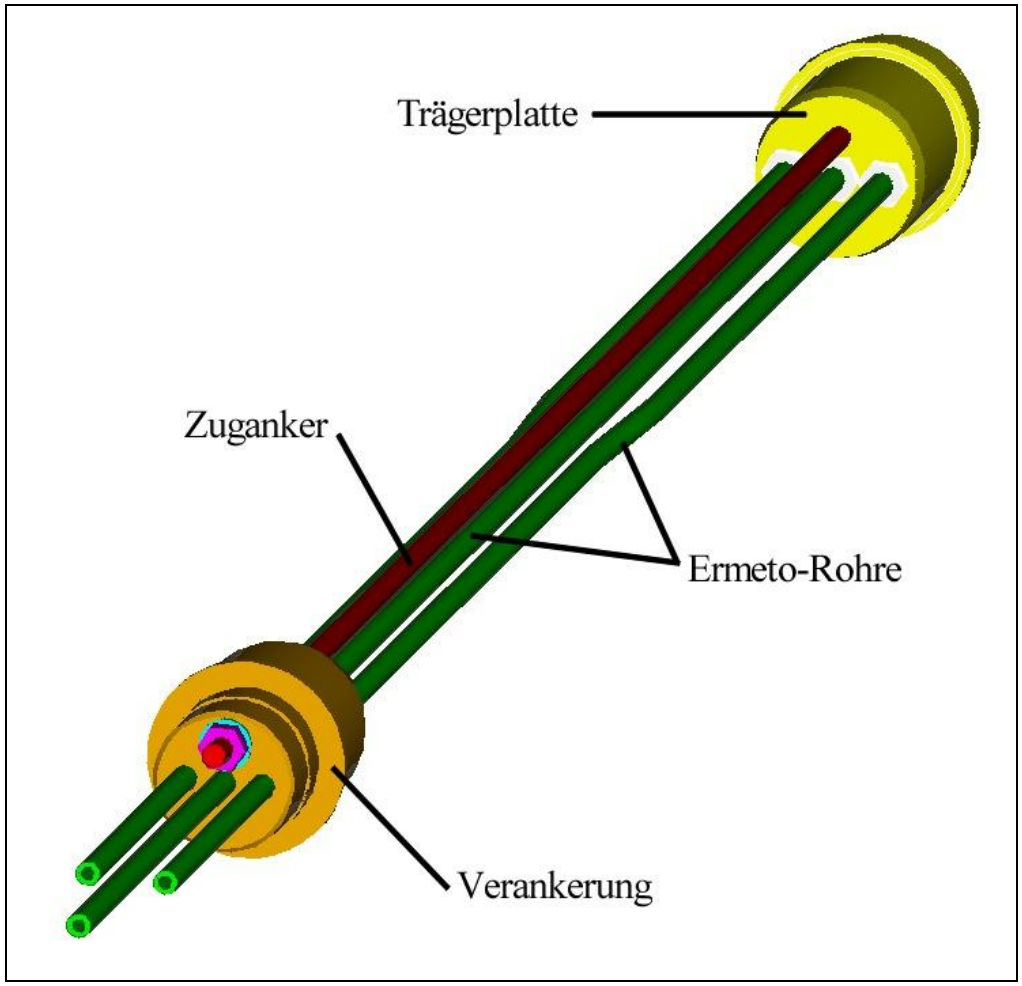


Bild 5.1 Innere Struktur des Trägerrohres (CFK-Rohr nicht dargestellt)

Die relevanten Einzelteile haben im Detail folgendes Aussehen:

a) Verankerung

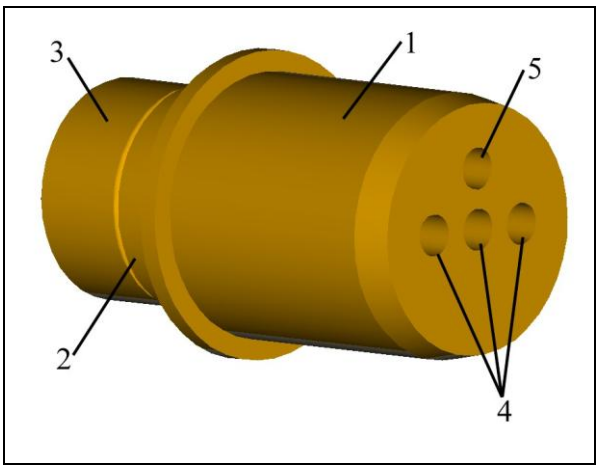


Bild 5.2 Verankerung

Die Verankerung wird in das CFK-Trägerrohr eingeklebt. Die Klebefläche (1) ist groß genug, um die angreifenden Zugkräfte allein durch Schub übertragen zu können. Eine Paßfläche (2) dient der Zentrierung in der Halterung, die Verschraubung erfolgt über ein M58 Gewinde (3). Insgesamt liegen vier Durchgangsbohrungen vor. Durch drei treten die Ermeto-Rohre (4) für die Wasserzirkulation, durch das vierte der Zuganker (5) zum Anheben des Kolbens.

b) Trägerrohr

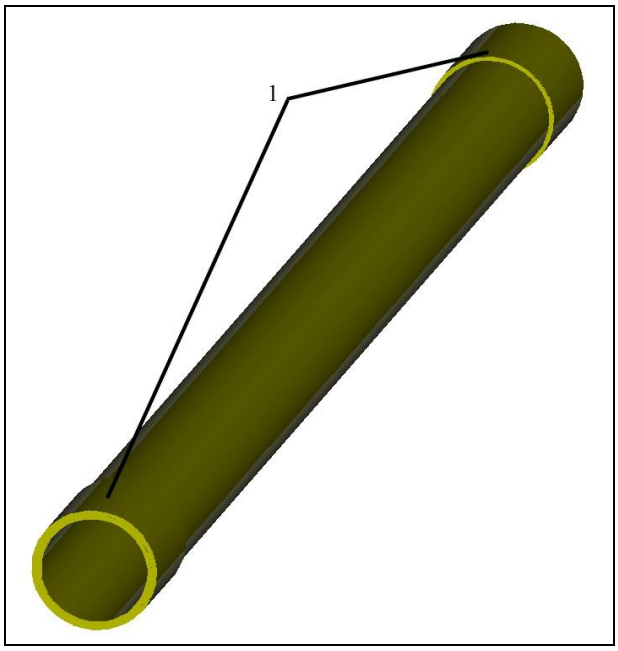


Bild 5.3 Trägerrohr

Das Trägerrohr besteht aus einem AWV mit $\omega = \pm 10°$. Am Anfang und am Ende befindet sich aus Sicherheitsgründen eine 90° Umfangswicklung (1).

c) Trägerplatte

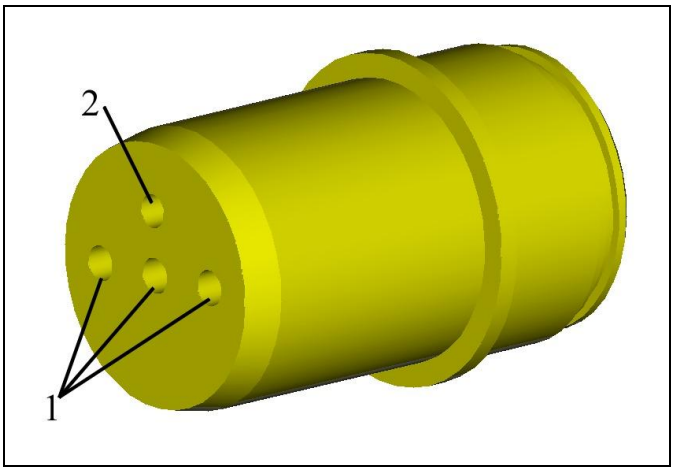


Bild 5.4 Trägerplatte (Rückseite)

An der Rückseite der Trägerplatte sind die Gewinde (1) für die Ermeto-Rohre zu erkennen. Nach oben versetzt befindet sich das Gewinde für den Zuganker (2).

Im montierten Zustand ergibt sich folgendes Gesamtbild des Trägerrohres:

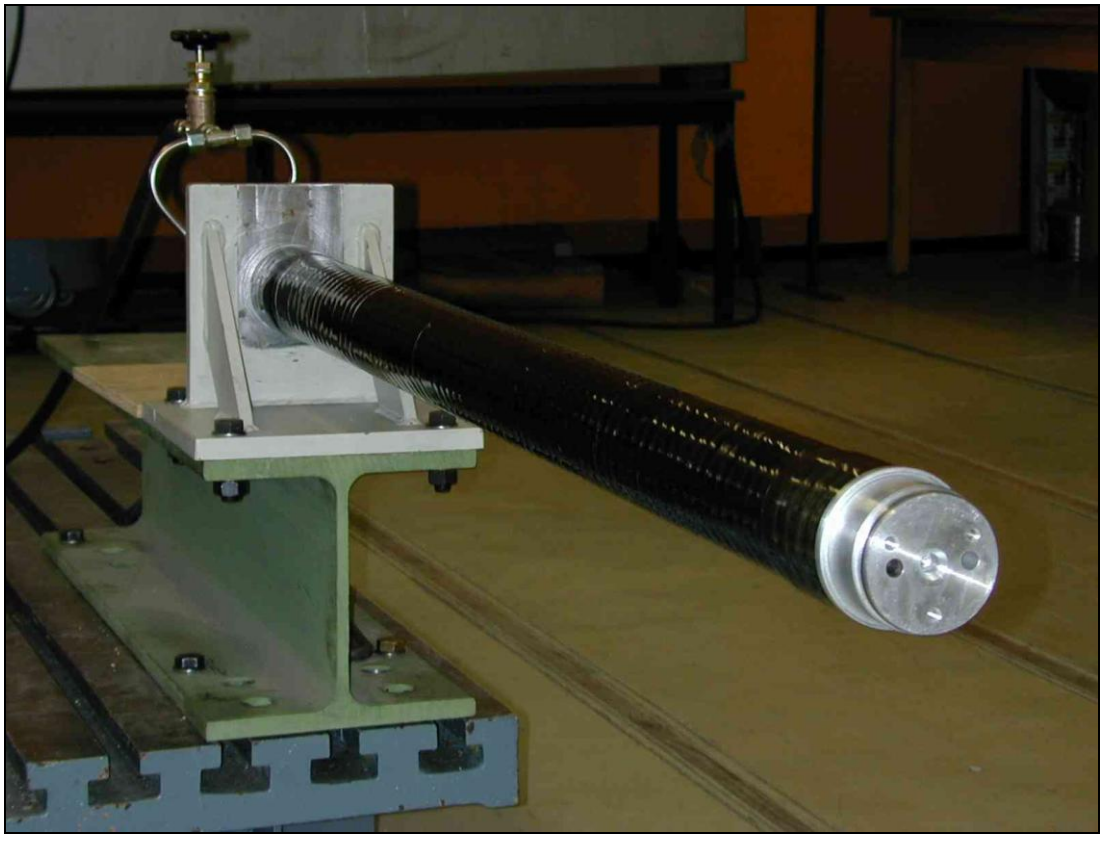


Bild 5.5 Trägerrohr auf Grundplatte montiert ohne Kolben

6 Neukonstruktion der Heizung

Die Neukonstruktion der Heizung umfasst zwei Hauptpunkte:

- Auswahl eines Heizverfahrens
- Konstruktion einer geeigneten Heizungsvorrichtung

Dabei müssen jeweils die an das Heizverfahren gestellten Anforderungen berücksichtigt werden.

6.1 Auswahl des Heizverfahrens

6.1.1 Anforderungen an das Heizverfahren

Bei der Neukonstruktion des PAZ-Verfahrens soll eine kontaktlose Außenheizung zur Ausführung kommen. Es ergeben sich folgende weitere Anforderungen:

- ausreichende Leistung
- natürliche Konvektion vermeiden
- keine Oxidation der Rohroberfläche
- schnelle Regelung

Eine ausreichende Leistung der Heizung ist vor allem im Hinblick auf eine geplante Serienfertigung und die damit verbundene Forderung nach einer möglichst hohen Vorschubgeschwindigkeit erforderlich. Nur wenn der Aufschmelzvorgang entsprechend schnell abläuft, kann der angestrebte Vorschub erreicht werden.
Eines der Hauptprobleme in der bisherigen V.E. mit Kokillenheizung war ein starker konvektiver Wärmestau an der Unterseite des Rohres und damit eine ungleichmäßige Temperaturverteilung über dem Rohrumfang. Probleme durch natürliche Konvektion lassen sich bei der geforderten horizontalen Anordnung der Versucheinrichtung nie ganz vermeiden. Bei der Auswahl des Heizverfahrens muss jedoch versucht werden, diese Probleme zu minimieren.
Ebenfalls zu vermeiden bzw. zu minimieren ist die Oxidation der Rohroberfläche durch das gewählte Heizverfahren. Dadurch wird die Qualität des Verbundrohres negativ beeinflusst.

6.1.2 Mögliche Lösungen und Verfahrensauswahl

Für eine kontaktlose Außenheizung kommen zwei prinzipielle Lösungen in Frage:

- Heizung durch Umluft
- Heizung durch IR-Strahler

Denkbar wäre auch eine Kombination der beiden Varianten, d.h. eine Hintereinanderschaltung von Umluft- und Strahlerzheizung.
Für eine Entscheidung müssen die Heizvarianten unter Berücksichtigung der oben formulierten Anforderungen miteinander verglichen werden:

	Umluftheizung	IR-Strahlerheizung
Vorteile	+ Sehr gleichmäßige Erwärmung durch erzwungene Konvektion + Heizstrecke beliebig einstellbar	+ Sehr große Flächenleistungen möglich (bis zu 20 W/cm²) + Möglichkeit, unter der Oberfläche aufzuschmelzen + Hohe Vorschubgeschwindigkeiten + Sehr schnelle Regelung + Im Vakuum einsetzbar
Nachteile	- Starke Oxidation der Rohroberfläche - Nur geringe Flächenleistungen möglich - Langsame Regelung - Ein geeigneter „Durchlaufofen“ muss erst gebaut oder angeschafft werden - Teuer	- Oxidation der Rohroberfläche - Die Heizstrahler incl. Regelung sind teuer - Probleme durch natürliche Konvektion

Tabelle 6.1 Vergleich von Umluftheizung und IR-Strahlerheizung

Zu beiden Heizvarianten wurden Grundlagenversuche in Zusammenarbeit mit der Firma Heraeus durchgeführt. Erwärmt wurden am Fachgebiet bewickelte Proberohre mit PA-Kernrohren und einer PA/E-Glas Wicklung. Dabei hatte die Wicklung den in Kapitel 4.2.1 erläuterten Aufbau.
Im Rahmen der Versuche war hauptsächlich zu klären, wie lange es bei den verschiedenen in Frage kommenden Verfahren dauert, bis an der Außenseite des PA-Kernrohres die Schmelztemperatur von ca. 200°C erreicht wird.
Aus den Versuchen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

a) Umluftheizung
   Bei der Beheizung durch Umluft erfolgt die Wärmeeinbringung fast ausschließlich über erzwungene Konvektion. Aufgrund der starken Verwirbelung der Luft treten Probleme durch natürliche Konvektion kaum auf.
   Der große Nachteil der Umluftheizung ist, dass nur geringe Aufheizgeschwindigkeiten erreicht werden können. Durch die Isolationswirkung der Glasfaserwicklung dauert es mehr als 30 Minuten, bis bei Beheizung mit 250°C heißer Luft an der Außenoberfläche des Kernrohres die zum Aufschmelzen benötigte Temperatur erreicht wird. (Vergleiche Versuchsberichte im Anhang).

Zusätzlich tritt an der Oberfläche der Proberohre eine Braunfärbung durch Oxidation des Thermoplastanteils der Hybridfasern auf. Diese verbietet eine Temperaturerhöhung der Heizluft zur Erzielung größerer Aufheizgeschwindigkeiten.
Durch die geringen Aufheizgeschwindigkeiten muss bei gegebener Vorschubgeschwindigkeit im PAZ-Verfahren ein überdimensional langer Durchlaufofen eingesetzt werden. Nur so lässt sich eine ausreichende Einwirkdauer der Heißluft realisieren.
Eine reine Umluftheizung wie auch eine Kombination aus Umluft- und Strahlerheizung sind daher zur Wärmeeinbringung beim PAZ-Verfahren ungeeignet und scheiden aus den weiteren Betrachtungen aus. Es wird im Folgenden nur noch die Realisierung einer Strahlerheizung betrachtet.

b) Strahlerheizung

Bei der Beheizung mit Heizstrahlern wird die zum Aufschmelzen erforderliche Wärmemenge fast ausschließlich durch Wärmestrahlung übertragen. Das Absorptionsverhalten des aufzuschmelzenden Materials bestimmt den Typ der eingesetzten Strahler. Absorbiert wird das Strahlungsspektrum, welches mit der Wellenlänge der Molekülschwingung des Materials übereinstimmt. Durch die Absorption nehmen die Moleküle Energie auf und das Material wird erwärmt.
Beim PAZ-Verfahren ist vor allem eine schnelle und gleichmäßige Erwärmung der Außenoberfläche des PA-Kernrohres gefordert. Dazu muss das Spektrum der Strahler so gewählt werden, dass die auf dem Kernrohr liegende Wicklung die Strahlung nur zu einem geringen Teil absorbiert und den größeren Teil zum PA-Kernrohr durchdringen lässt. Die schlechte Wärmeleitung in der noch nicht aufgeschmolzenen Wicklung führt bei zu starker Absorption der Wicklung zu einer Überhitzung und damit zu einer Oxidation und Zerstörung der Polyamidmatrix an der Rohroberfläche. Durchdringt dagegen die Strahlung die Wicklung, erfolgt eine Erwärmung des PA-Kernrohres unter der Oberfläche.

Unter Berücksichtigung des Absorptionsspektrums von PA (Bild 6.1) scheinen zur Erfüllung der Anforderungen kurz- bis mittelwellige Infrarotstrahler mit einer Wellenlänge im Bereich von 3 μm am besten geeignet. In diesem Fall stimmt das Absorptionsmaximum des PA mit dem Intensitätsmaximum der Strahler (Bild 6.2) überein.

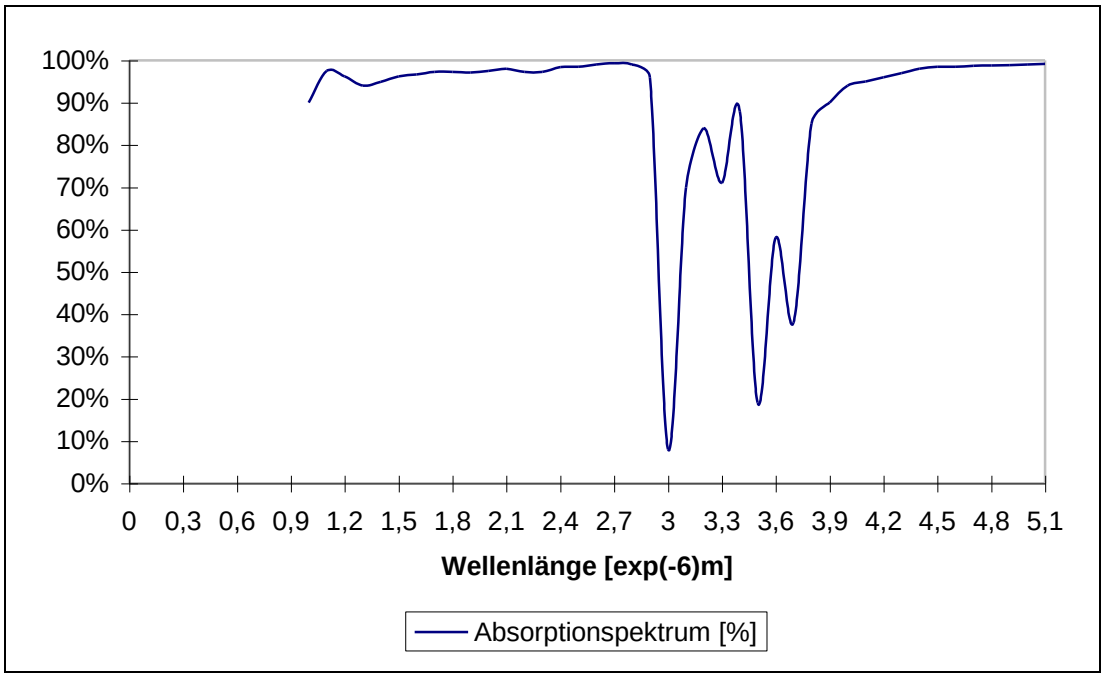


Bild 6.1 Skizziertes Absorptionsspektrum von PA6

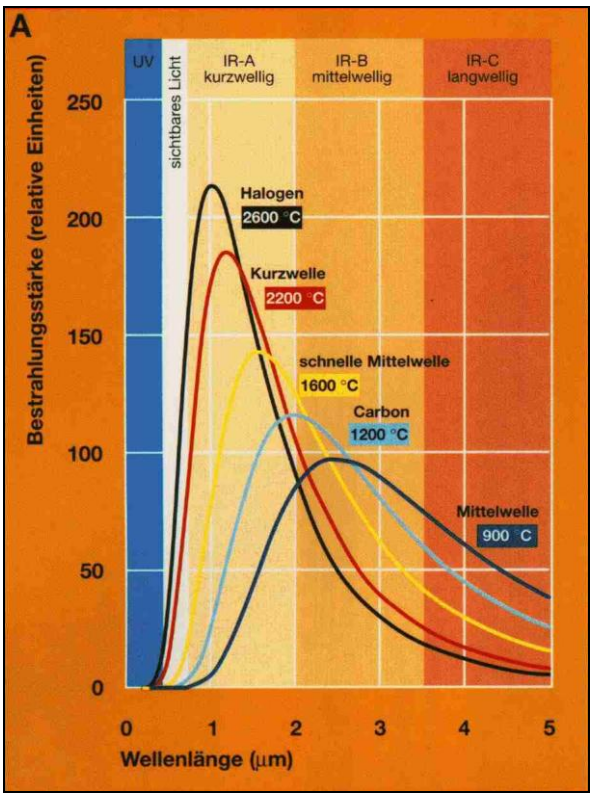


Bild 6.2 Intensitätsverteilung verschiedener Infrarotstrahler

Zur experimentellen Ermittlung der am besten geeigneten Strahler wurden in Zusammenarbeit mit Heraeus Aufschmelzversuche mit verschiedenen Strahlertypen vorgenommen.
Die Versuchsberichte können im Anhang nachgelesen werden.

Die schnellste Aufheizung auf die geforderte Temperatur lässt sich mit kurzwelligen Infrarotstrahlern (ca. 1,2 μm Wellenlänge) erreichen. Allerdings muss dabei schon nach kurzer Zeit die Heizleistung stark gedrosselt werden, um eine bräunliche Verfärbung der Oberfläche durch Oxidation der Schlichte zu verhindern. In diesem Zusammenhang muss über den Einsatz von oxidationshemmenden Mitteln nachgedacht werden. Durch die Drosselung der Leistung verschiebt sich das Intensitätsmaximum der Strahlung in den mittelwelligen Bereich.
Die ideale Lösung besteht aus einer Kombination von mittelwelligen Infrarotstrahlern zur Vorwärmung und kurzwelligen Halogenstrahlern zur schnellen Zuführung der benötigten Schmelzenergie. Bei den angestrebten Rohrdurchmessern von ca. 100 mm und den erforderlichen Strahlerabständen zu den Versuchsrohren müssen für eine gleichmäßige Erwärmung bei stationärer Strahlerposition 12 Strahler auf dem Umfang angeordnet werden. Die Gesamtlänge der Heizstrecke muss mindestens 500 mm betragen (350 mm Infrarot, 150 mm Halogen, Vorschub max. 2,5 mm/sec.).

Aus Kostengründen werden in den Versuchen ausschließlich Strahler aus dem Bereich „schnelle Mittelwelle“ mit einer Baulänge von 800 mm eingesetzt. Diese haben den Vorteil, dass sie günstiger und deutlich robuster als kurzwellige Halogenstrahler sind. Um die Anzahl der benötigten Strahler zu reduzieren wird eine Drehvorrichtung für die Heizung vorgesehen. Dadurch sind 6 über den Umfang verteilte Strahler ausreichend.

6.2 Konstruktion der Heizungsaufnahme

6.2.1 Anforderungen an die Heizungsaufnahme

Bei der Konstruktion der Heizungsaufnahme sind mechanische, thermische und elektrische Anforderungen zu berücksichtigen.

a) Mechanische Anforderungen
   Die mechanischen Anforderungen werden dadurch bestimmt, dass für das Heizverfahren mit Strahlern auf fast keine Erfahrungen zurückgegriffen werden kann. Die geometrischen Parameter der Heizung sind daher unbekannt. Dies bezieht sich auf den radialen Abstand der Strahler von der Rohroberfläche, ihre Verteilung über dem Umfang, die axiale Stellung der Strahler zueinander sowie die Position der gesamten Heizung relativ zum Kolben. Zusätzlich muss durch die Beschränkung auf 6 Strahler die Heizung für eine gleichmäßige Intensitätsverteilung über dem Rohrumfang um die Rohrachse drehbar gelagert werden.

b) Thermische Anforderungen:
   Die thermischen Anforderungen zielen in erster Linie auf eine möglichst hohe Effektivität und damit auf eine Minimierung der Strahlungsverluste der Heizung ab. Dazu ist eine Isolation der Heizung erforderlich.
   Ebenfalls zu den thermischen Anforderungen zählt, dass die Temperatur-verteilung im Innern der Heizung im Hinblick auf Probleme durch natürliche Konvektion durch Vorversuche zu ermitteln ist.

c) Elektrische Anforderungen:
Elektrische Anforderungen betreffen in erster Linie die Regulierung der Strahlerleistung. Bei einer Leistung von jeweils 2 kW bzw. einer Gesamtleistung von 12 KW können die Strahler während eines Versuches nicht ständig auf voller Leistung gefahren werden. Es sind deshalb Möglichkeiten zur unabhängigen Steuerung oder besser noch zur Regelung der Strahlerleistung vorzusehen.

Zusammengefasst ergeben sich folgende Anforderungen an die Heizungsaufnahme:

Mechanische Anforderungen
Verstellmöglichkeiten für: • Radialen Abstand der Strahler • Anordnung der Strahler am Umfang • Position der Strahler relativ zum Kolben • Position der Strahler relativ zueinander
Thermische Anforderungen
• Hohe Effektivität der Strahler • Strahlungsverluste minimieren • Natürliche Konvektion vermeiden
Elektrische Anforderungen
• Regelung der Strahlerleistung vorsehen

Tabelle 6.2 Anforderungen an die Heizungsaufnahme

6.2.2 Konstruktive Umsetzung

Die konstruktive Umsetzung erfolgt unter Berücksichtigung der oben formulierten Anforderungen:

a) Mechanische Anforderungen
Zur Erfüllung der mechanischen Anforderungen wird das Grundgerüst der Heizung aus Mechanik-Grundelementen der Firma Bosch zusammengestellt. Dabei handelt es sich um Aluminiumprofile, die im Baukastenprinzip verbunden werden und einen einfachen modularen Aufbau ermöglichen.
Die gesamte Heizungsaufnahme wird in zwei Baugruppen unterteilt, die im Folgenden als Heizungsgestell und Heizungstrommel bezeichnet werden. Es ergibt sich folgender Aufbau:

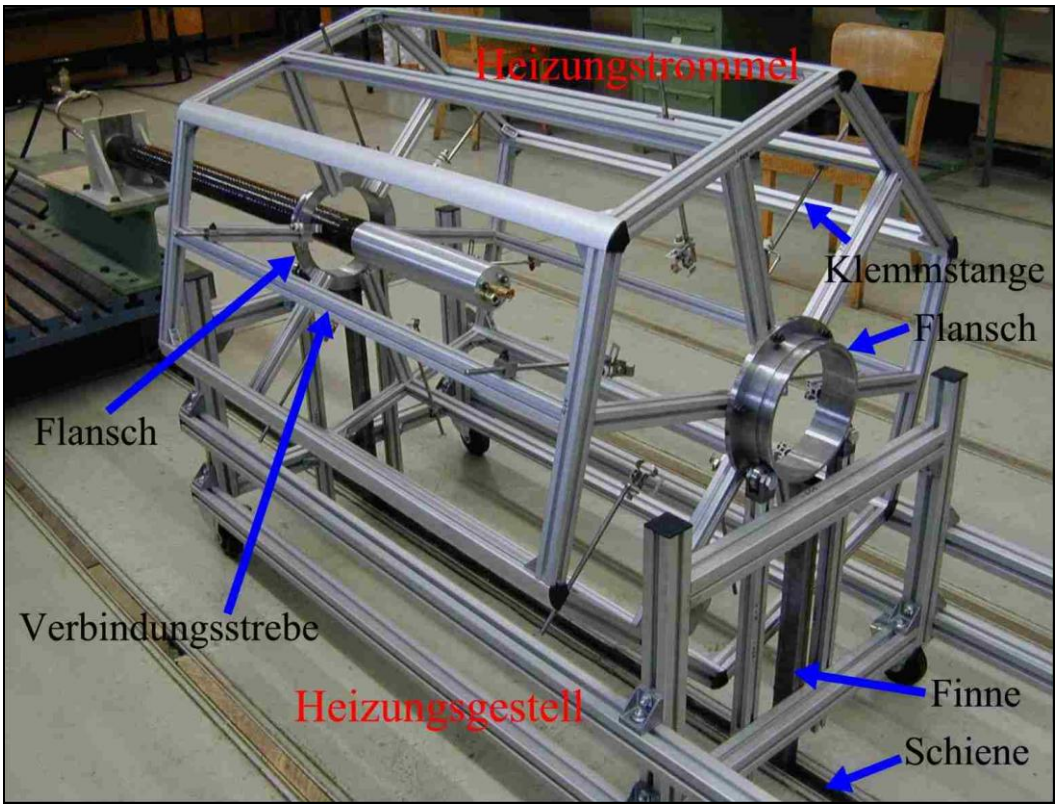


Bild 6.3 Grundstruktur der Heizung

Die beiden Unterbaugruppen haben die folgenden Funktionen:

- Heizungsgestell:

Das Heizungsgestell dient der Lagerung der Heizungstrommel. Es steht auf Rollen und wir durch zwei Finnen in einer Schiene im Boden geführt. Dadurch hat das Heizungsgestell einen translatorischen Freiheitsgrad in Richtung der Kolbenlängsachse, und die gesamte Heizung kann relativ zum Kolben in axialer Richtung verschoben werden.

- Heizungstrommel:

Die Heizungstrommel dient der Aufnahme der Strahler und ist mit Hilfe von zwei Flanschen um die Kolbenachse drehbar auf dem Heizungsgestell gelagert. Sie ist sechseckig und hat einen Durchmesser von ca. 900 mm. Die Befestigung der Strahler erfolgt über sog. Klemmstangen in der Mitte der Seitenflächen des Sechsecks an den dort liegenden Verbindungsstreben. Die Klemmstange ermöglicht aufgrund ihrer Länge und des großen Trommeldurchmessers eine Variation des radialen Abstands der Strahler von der Rohroberfläche im Bereich von ca. 50 bis 350 mm.
Die Gesamtlänge der Trommel ist mit ca. 1100 mm deutlich größer als die Strahlerlänge. Damit wird in der Trommel die Verschiebung der Strahler relativ zueinander ermöglicht.

Durch Verschieben des Heizungsgestells, Drehen der Heizungstrommel oder Verstellen der Strahler an der Klemmstange können mit diesem Grundaufbau der Heizung sämtliche mechanische Anforderungen erfüllt werden.

b) Thermische Anforderungen:
Um die thermischen Anforderungen zu erfüllen, d.h., um vor allem durch eine Minimierung der Strahlungsverluste eine konzentrierte Wärmeeinbringung zu erzielen, muss die Heizungstrommel isoliert werden.
Die Isolation hat außerdem die Aufgabe, das Grundgerüst der Trommel vor der Strahlung zu schützen. Bei der hohen Strahlerleistung käme es ansonsten zu einer unzulässig großen Erwärmung der verwendeten Aluminiumprofile. Die Isolation ist daher im Innern der Heizungstrommel anzubringen.

Für die Isolation wird ein zweischichtiger Aufbau gewählt (Bild 6.4). Das eigentliche Isolationsmaterial wird auf eine Trägerplatte aufgeklebt, die in den Nuten der Aluminiumprofilen befestigt wird.

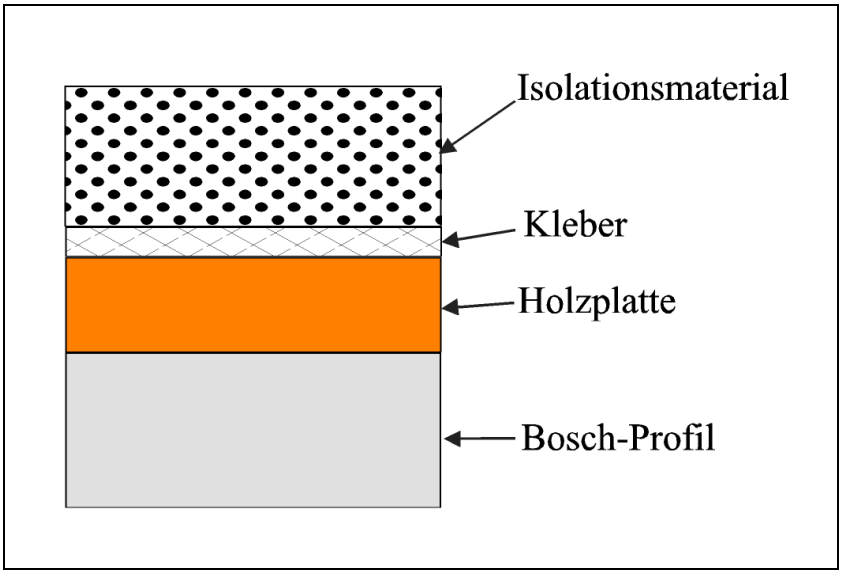


Bild 6.4 Aufbau der Isolation

Bei dem verwendeten Isolationsmaterial handelt es sich um aluminiumkaschierte Glasfasermatten der Firma Jutec mit einer Dicke von ca. 12 mm und einer Dauertemperaturbeständigkeit von 500°C. (Näheres siehe Datenblatt im Anhang). Als Trägerplatte werden im Hinblick auf eine einfache Bearbeitbarkeit Sperrholzplatten mit einer Dicke von 6 mm eingesetzt. Durch die gute und vollständige Isolationswirkung der Glasfasermatten sind keine Probleme mit der Hitzebeständigkeit der Holzplatten zu erwarten. Die Verklebung der Matten auf den Platten erfolgt mit einem hitzebeständigen Spezialkleber, der ebenfalls von der Firma Jutec geliefert wird.
Insgesamt werden zur Isolation der Trommel acht isolierte Sperrholzplatten benötigt.
Sie werden gemäß Bild 6.5 angebracht:

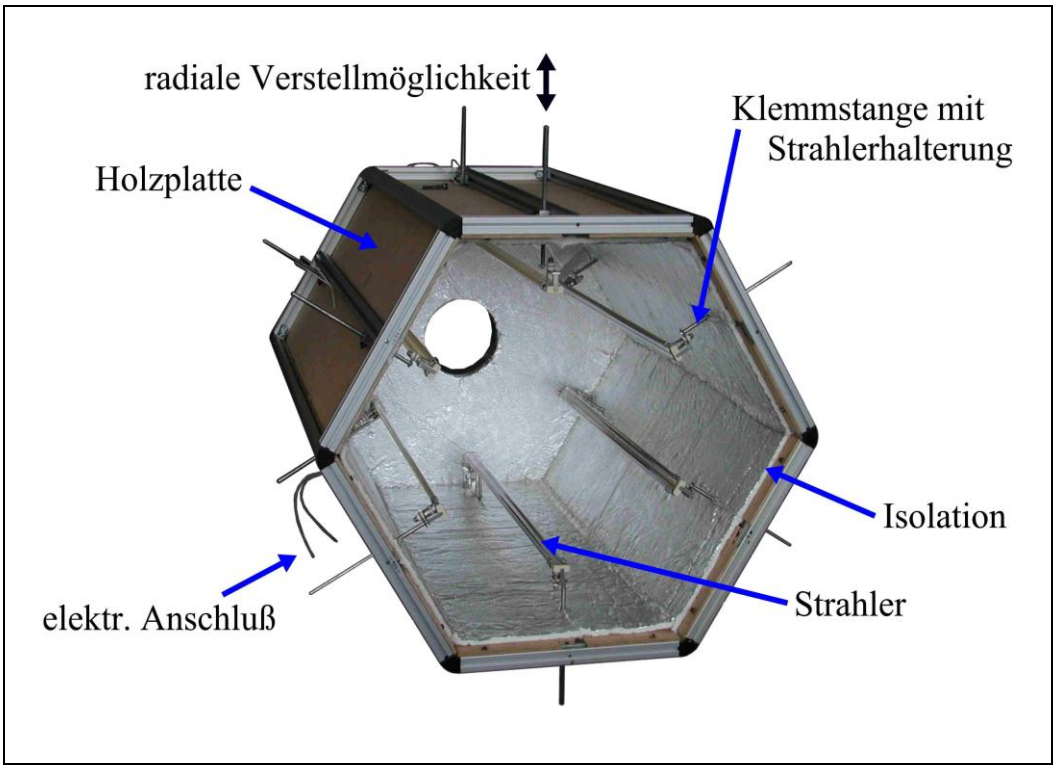


Bild 6.5 Heizungsisolation

Sechs Isolationsplatten werden innen an den Seiten der Trommel befestigt. An den Durchtrittsstellen der Klemmstangen für die Strahler sind jeweils Nuten eingefräst, in denen die Strahler radial verstellt bzw. axial verschoben werden können.
Die restlichen beiden Isolationselemente werden an den Stirnseiten der Trommel angebracht. Durch eine zentrale Öffnung, die sich mit der des Flansches deckt, wird während der Versuche das Versuchsrohr geführt.

Zur Überwachung der Temperatur bzw. zur generellen Ermittlung der Temperaturverteilung in der Heizungstrommel werden im Trommelinnern Drähte gespannt, an denen an definierten Stellen 6 Thermoelemente befestigt werden. Vorversuche müssen zeigen, ob durch natürliche Konvektion ein Wärmestau an der Rohrunterseite auftritt, der eine Ventilation der Trommel erforderlich macht.

c) Elektrische Anforderungen:
Bei den elektrischen Anforderungen ist eine selbsttätige Regelung der Strahler wünschenswert. Diese kann wie folgt realisiert werden:
Jeder Strahler wird mit einem separaten Regler verbunden. Die Rückführung und damit die Schließung der Regelkreises wird durch je ein Thermoelement erreicht, welches in kurzem Abstand vor dem zugehörigen Strahler plaziert wird. Zur besseren Absorption der Strahlung sind die Thermoelemente auf schwarz gefärbte Trägerplättchen aufgelötet.

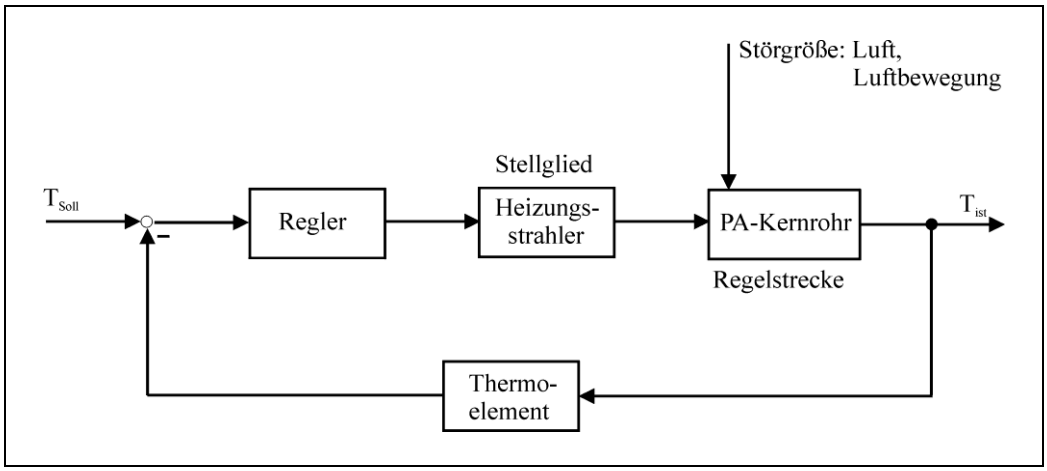


Bild 6.6 Regelkreis für die Heizstrahler

Für jede Stellung des Reglers kann am zugehörigen Thermoelement eine der Stellung des Reglers entsprechende Temperatur ermittelt werden. Es ergibt sich eine Kalibrierkurve.
Der Zusammenhang zwischen der Temperatur im Bereich der Thermoelemente und der Temperatur an der Rohroberfläche kann ebenfalls experimentell ermittelt werden. Man erhält eine zweite Kalibrierkurve, die zusammen mit der ersten die Oberflächentemperatur des Versuchsrohres einer Regelung zugänglich macht.

Die Bilder 6.7 und 6.8 zeigen die fertig montierte Heizung.

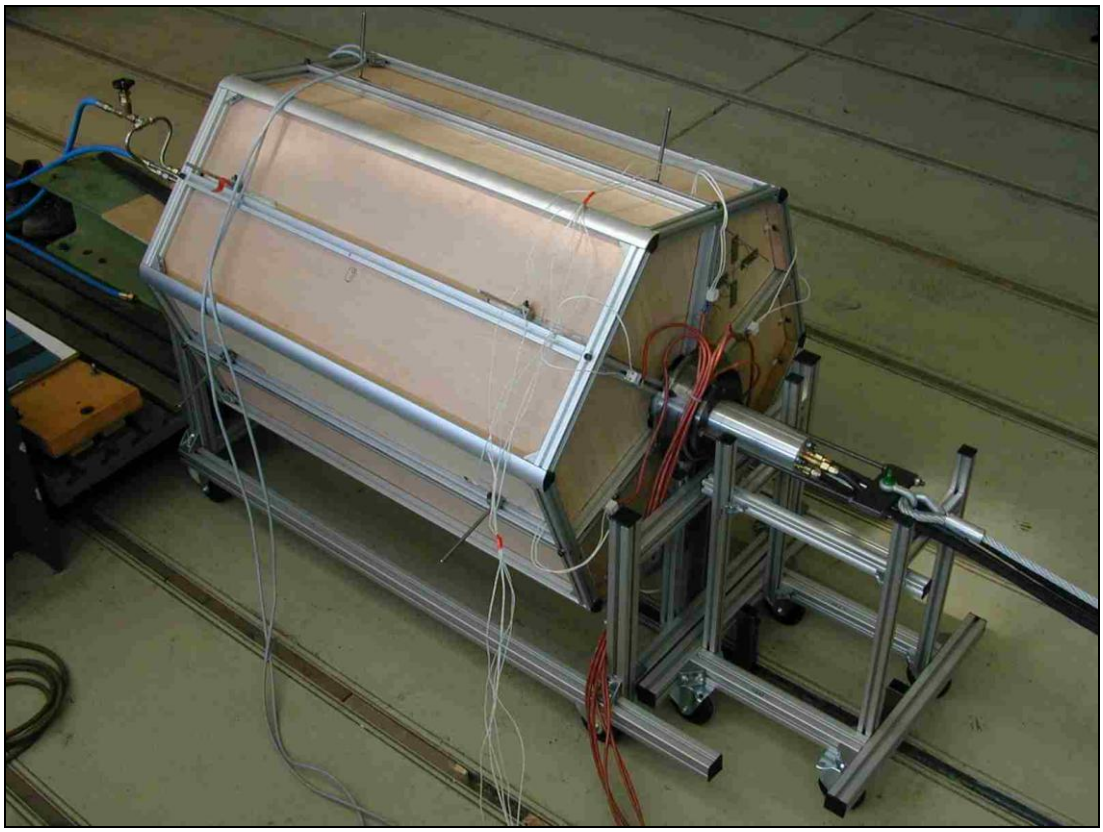


Bild 6.7 Heizung im montierten Zustand

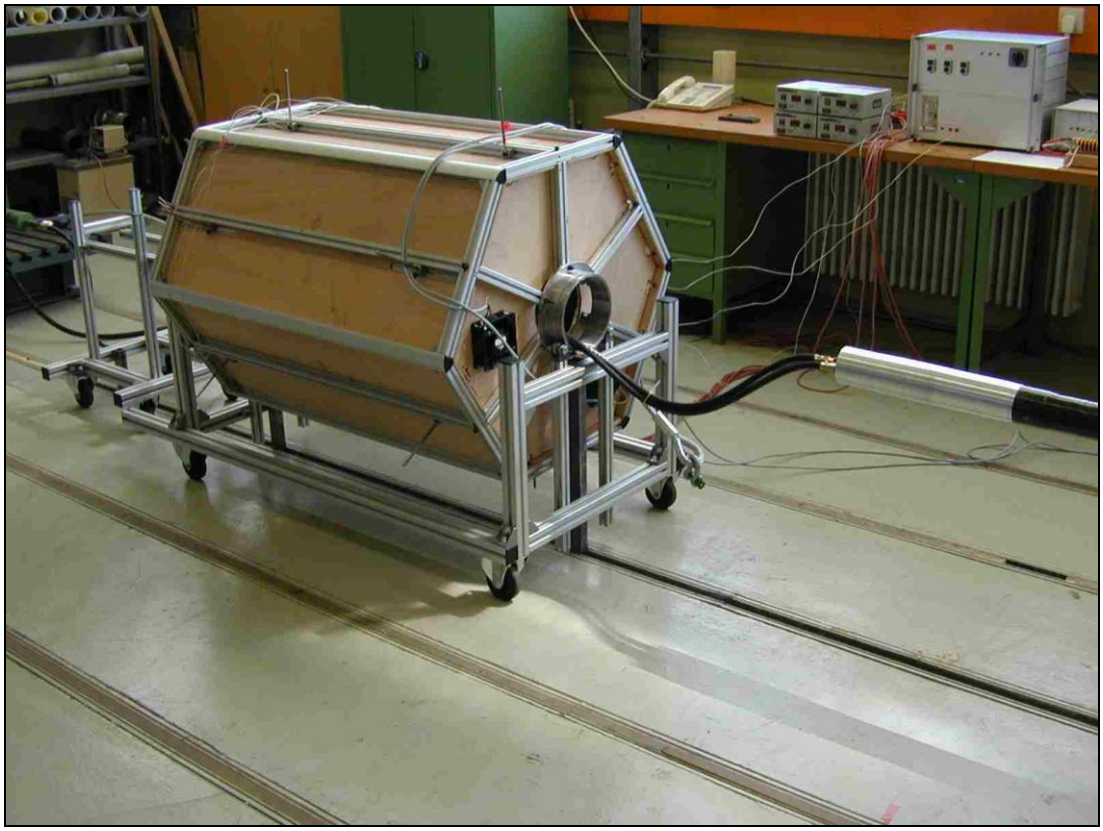


Bild 6.8 Heizung und Kolben im montierten Zustand

7 Neukonstruktion der Abzugsvorrichtung

Die Abzugsvorrichtung hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Erzeugen der benötigten Abzugskräfte (Krafterzeugung)
- Leiten der Abzugskräfte zum Versuchsrohr (Kraftleitung)
- Stützen des Versuchsrohres nach Verlassen des Umformbereiches

7.1 Krafterzeugung

Das Prinzip der Krafterzeugung wird aus der bestehenden V.E. übernommen. Die benötigten Abzugskräfte werden mit Hilfe eines doppelt wirkenden Hydraulikzylinders mit einem Hub von 1000 mm erzeugt. Dieser hat bei einem zulässigen maximalen Betriebsdruck von 100 bar eine Druckkraft von 31,2 kN und eine maximale Zugkraft von 23,1 kN.
Über ein in den Kreislauf eingebautes Stromventil ist es möglich, den Ölstrom zu regulieren und damit die Vorschubgeschwindigkeit des Zylinders stufenlos zwischen 2 cm/min und 12 cm/min zu verstellen. Der Zusammenhang zwischen Stellung des Stromventils und Vorschubgeschwindigkeit kann dem Anhang entnommen werden.

7.2 Kraftleitung

Auch das Prinzip der Kraftleitung wird aus der alten V.E. übernommen. Der Kraftfluß erfolgt über ein Stahlseil, das den Zylinder mit dem Versuchsrohr verbindet.
Zu überarbeiten sind die Verbindungen zwischen Zylinder und Drahtseil auf der einen und zwischen Stahlseil und Versuchsrohr auf der anderen Seite.

7.2.1 Verbindung zwischen Hydraulikzylinder und Stahlseil

Das Hauptproblem bei Verbindung zwischen Hydraulikzylinder und Stahlseil besteht darin, dass bei einem Zylinderhub von 1m das Versuchsrohr über eine Distanz von ca. 1,8 m bewegt werden muss.
Diese Distanz setzt sich aus der Länge des Versuchsrohres (ca. 1,3m) und der Kolbenlänge (ca. 45 cm) zusammen. Das Versuchsrohr liegt vor Versuchsbeginn hinter dem Kolben auf dem CFK-Trägerrohr und muss während des Versuches komplett über den Kolben bewegt werden.
Damit muss nach Möglichkeiten gesucht werden, den effektiven Zylinderhub zu vergrößern. Es bieten sich zwei Lösungen an:

- Hubweg auf zwei Zylinderhübe zu verteilen
- Hubweg durch Umlenkung vergrößern

a) Hubweg auf zwei Zylinderhübe verteilen
Durch Hintereinanderschaltung von zwei Zylinderhüben wird ein ausreichender Gesamtweg von ca. 2m erreicht. Der Vorteil dieser Variante ist, dass stets die gesamte Zylinderkraft als Zugkraft zur Verfügung steht. Diesem Vorteil stehen zwei Nachteile gegenüber:

- Bei einer Kombination von zwei Hüben muss der Zylinder zwischenzeitlich in die Ausgangslage zurückgefahren werden. Ein Zurückfahren des Zylinders dauert aufgrund der geringen maximalen Vorschubgeschwindigkeit zu lange, um einen kontinuierlichen Abzug und damit einen kontinuierlichen Produktionsprozeß zu ermöglichen.
- Ein Verzicht auf das Zurückfahren erfordert ein kompliziertes Umlenksystem, da eine Zylinderbewegung in zwei unterschiedliche Richtungen jeweils in eine gleichgerichtete Zugbewegung am Versuchsrohr umgewandelt werden muss. Zusätzlich sind die Kräfte beim Ein- und Ausfahren des Zylinders unterschiedlich. Damit schwanken die Abzugskräfte während des Versuches

Aus diesen beiden Gründen wird von der Möglichkeit, den benötigten Hubweg auf zwei Zylinderhübe zu verteilen, abgesehen.

b) Hubweg durch Umlenkung vergrößern
In dieser Anordnung wird der Hubweg durch eine Umlenkung nach dem Flaschenzugprinzip vergrößert. Für die Verdoppelung des effektiven Zylinderweges auf 2m reicht eine freie Umlenkrolle aus.
Der Vorteil ist, dass das komplette Rohr mit einem einzigen Zylinderhub bei konstanter Abzugskraft über den Kolben gezogen werden kann. Verbunden damit ist der Nachteil, dass durch die Umlenkung nur die halbe Kraft des Zylinders am Versuchsrohr anliegt.
Wird der Hydraulikzylinder in Druckrichtung betrieben, können auch bei einer Umlenkung ausreichende Abzugskräfte von mehr als 15 kN erreicht werden. Die Entscheidung für die Neukonstruktion fällt deshalb zugunsten dieser Variante

Für einen möglichst einfachen Aufbau wird die benötigte freie Umlenkrolle an der Spitze der Kolbenstange des Hydraulikzylinders befestigt. Eine geeignete Rolle mit einem Durchmesser von 200mm kann aus der alten V.E. übernommen werden. Lediglich die Halterung, mit der die Rolle auf der Kolbenstange befestigt wird, muss neu konstruiert werden. Sie wird als gabelförmige Schweißkonstruktion ausgeführt.
Es ergibt sich folgender prinzipieller Aufbau:

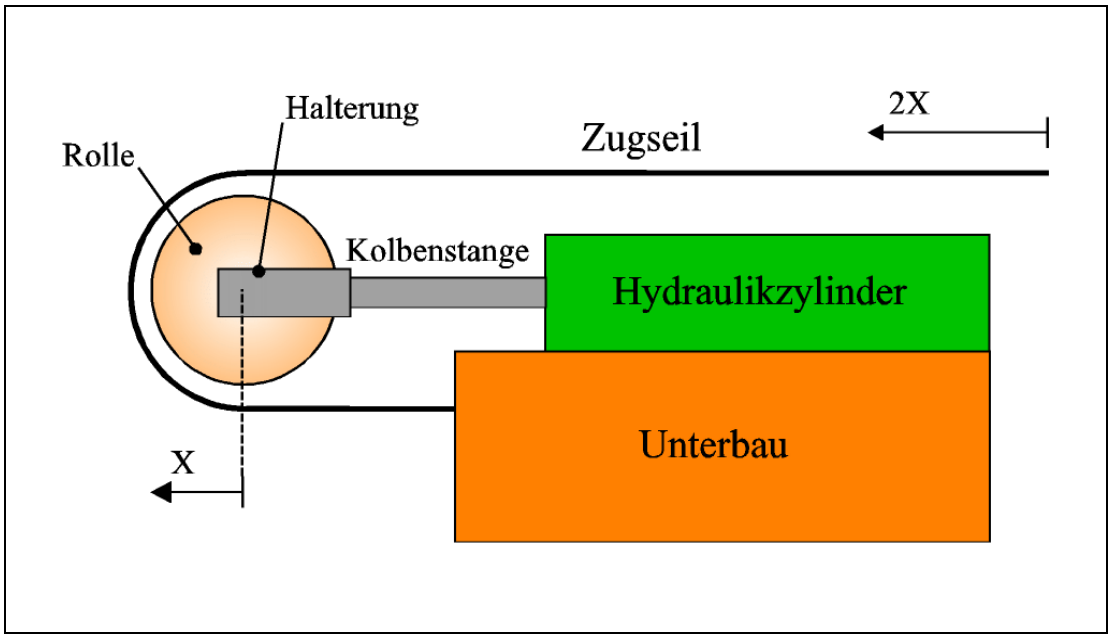


Bild 7.1 Verdoppelung des Hubes durch Umlenkrolle

Ein Zylinderhub von 1000 mm führt zu einem ausreichenden Seilvorschub von 2000mm am Versuchsrohr. Zu berücksichtigen ist, dass die Kolbenstange mit der vollen Kolbenkraft auf Druck belastet wird. Eine Nachfrage beim Hersteller ergibt, dass die Kolbenstange bereits bei einem Betriebsdruck von 63 bar knickgefährdet ist (siehe Anhang). Da Zylinder und Hydraulikaggregat mit einem Maximaldruck von 100 bar betrieben werden können, ist, um ein Ausknicken der Kolbenstange zu verhindern, eine Zwangsführung der Kolbenstange vorzusehen.
Zu Führung der Kolbenstange wird die Achse, auf der die Rolle in der Gabel sitzt, seitlich nach rechts und links um je einen Achsenstummel verlängert. Die Achsenstummel ragen in zwei seitlich liegende Führungsschienen, die nur eine Bewegung in Richtung der Zylinderachse zulassen. Als Führungsschiene dient ein gewöhnliches U-Profil, wobei die Kontur der Achse an die Innenkontur des U-Profils angepasst wird. Die Führungsschienen sind über jeweils drei Füße auf der Nutenplatte befestigt, die auch den Hydraulikzylinder trägt.

Im montierten Zustand ergibt sich folgendes Bild:

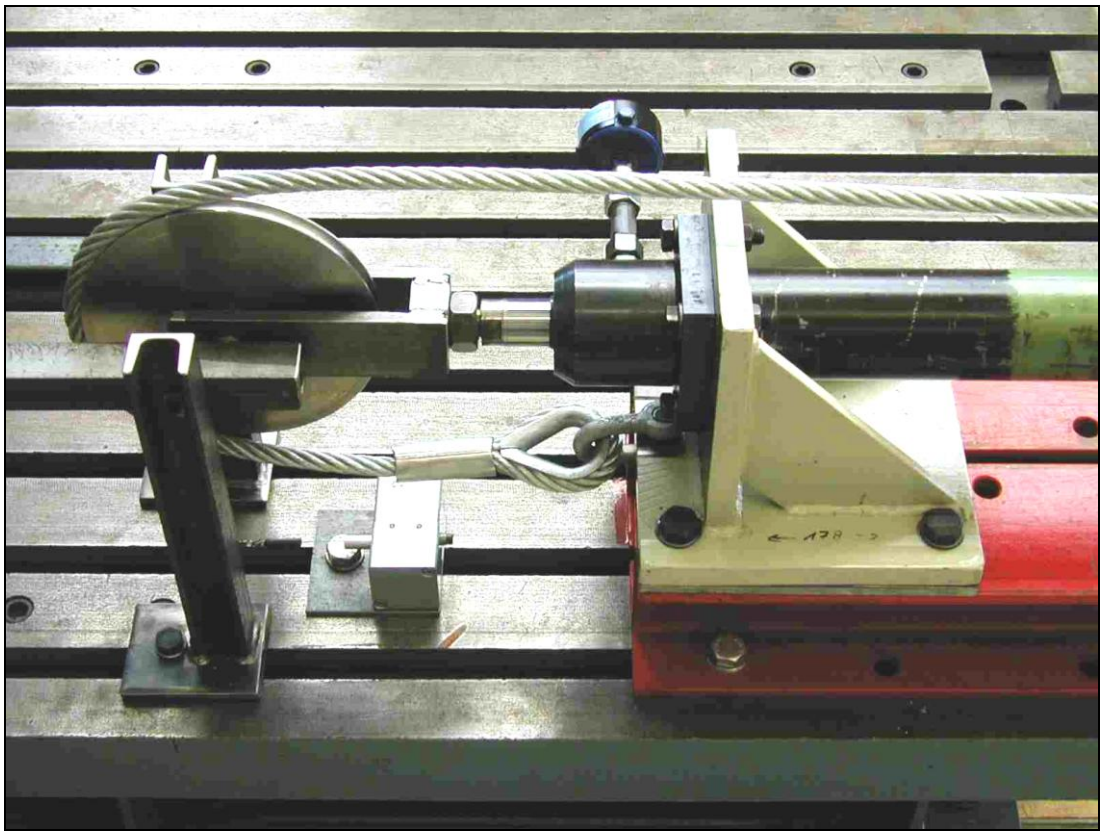


Bild 7.2 Detailaufnahme der Umlenkrolle

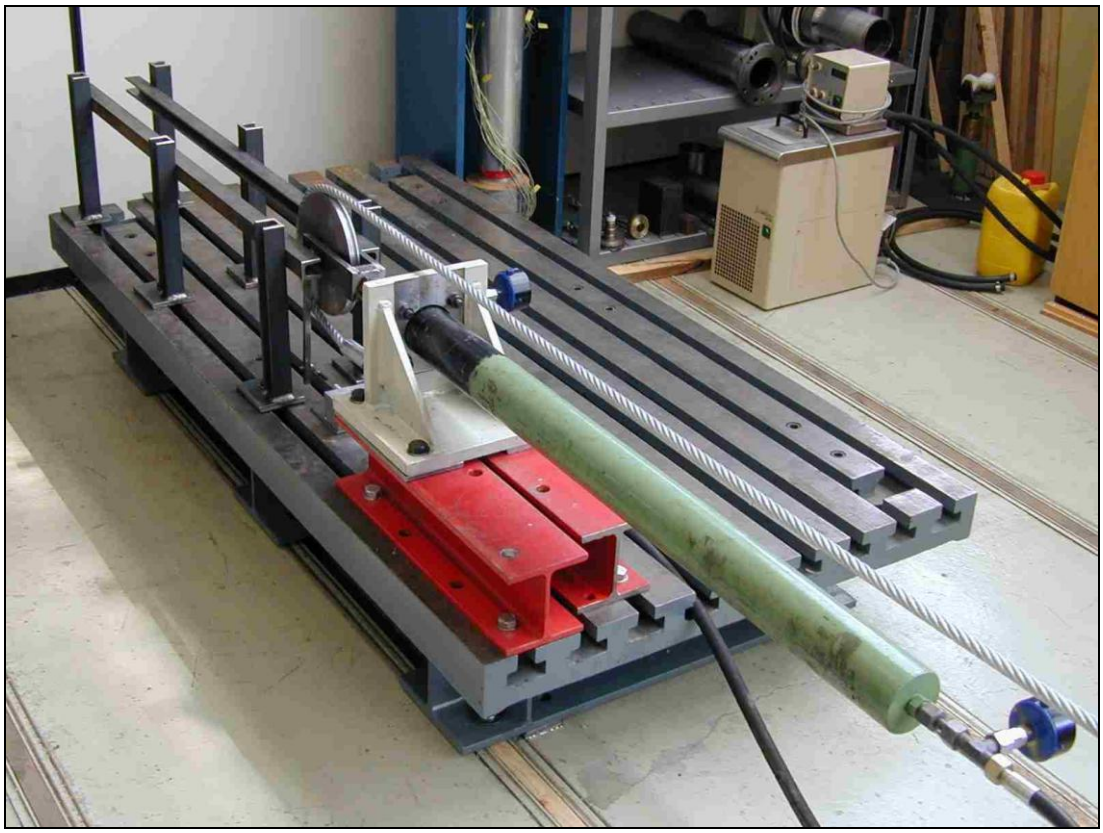


Bild 7.3 Gesamtaufbau der Zugvorrichtung

7.2.2 Verbindung zwischen Stahlseil und Versuchsrohr

Bei der Verbindung zwischen Stahlseil und Versuchsrohr muss darauf geachtet werden, dass die Zugkräfte zentrisch in das Versuchsrohr eingeleitet werden, um ein Verkanten des Rohres während des Versuches zu verhindern.
Die Schwierigkeit besteht darin, dass vor Versuchsbeginn der Kolben um ca. 30 cm nach vorne aus dem Versuchsrohr herausragt. Die Zugkräfte müssen daher am Kolben vorbei geleitet werden.
Die Einleitung der Zugkräfte in das Versuchsrohr erfolgt über einen Stiftkranz, im Bild 7.4 als vorderer Stiftkranz bezeichnet. Der vordere Stiftkranz dient der Bewicklung und bleibt nach dem Wickelvorgang fest mit dem Versuchsrohr verbunden.

In der bestehenden V.E. wird zur Überbrückung der Distanz, um die der Kolben aus dem vorderen Stiftkranz herausragt, der Stiftkranz durch Distanzstücke so weit verlängert, bis der komplette Kolben im Innern verschwindet. Der Stiftkranz ragt in dieser Anordnung nach vorne über den Kolben hinaus und kann mit einem Deckel verschlossen werden, an dem zentrisch das Seil angebracht wird.

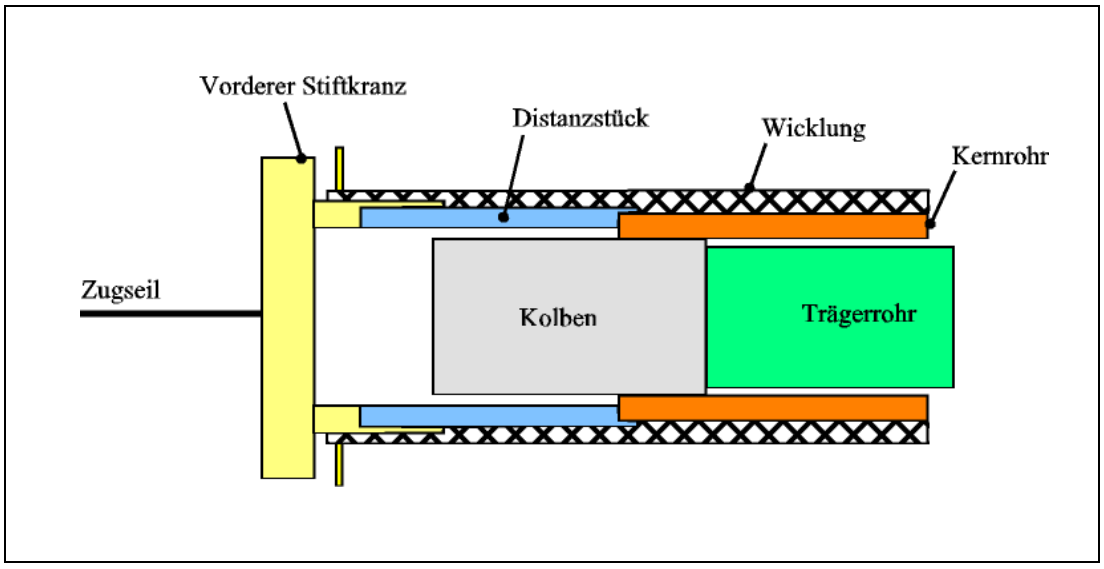


Bild 7.4 Krafteinleitung in der alten Versuchseinrichtung

Diese Variante hat zwei Nachteile:

- Die Distanzstücke müssen komplett bewickelt werden, obwohl in diesem Bereich keine Kompaktierung erfolgen kann.
- Wird das Versuchsrohr über den Kolben gezogen, so erzeugen der Stiftkranz und die angekoppelte Zugvorrichtung aufgrund ihres Eigengewichts ein wachsendes Biegemoment im Umformbereich, durch das sich das Rohr verziehen kann. Der Einsatz der Distanzstücke vergrößert den Hebelarm und damit das Biegemoment.

Für die Neukonstruktion wird deshalb ein anderer Weg eingeschlagen:
Die Seilkraft wird in zwei gleich große Kräfte aufgeteilt, die rechts und links versetzt vom Kolben am Stiftkranz angreifen. Wichtig für eine zentrische Krafteinleitung ist, dass die Zugrichtung des Seiles exakt mit der Kolbenachse übereinstimmt.

Für die gleichmäßige Verteilung der Seilkraft gibt es zwei Möglichkeiten:

a) Verteilung der Kraft durch eine Umlenkrolle

Es wird eine zusätzliche Umlenkrolle am Stahlseil befestigt. Der Seilverlauf sieht wie folgt aus:

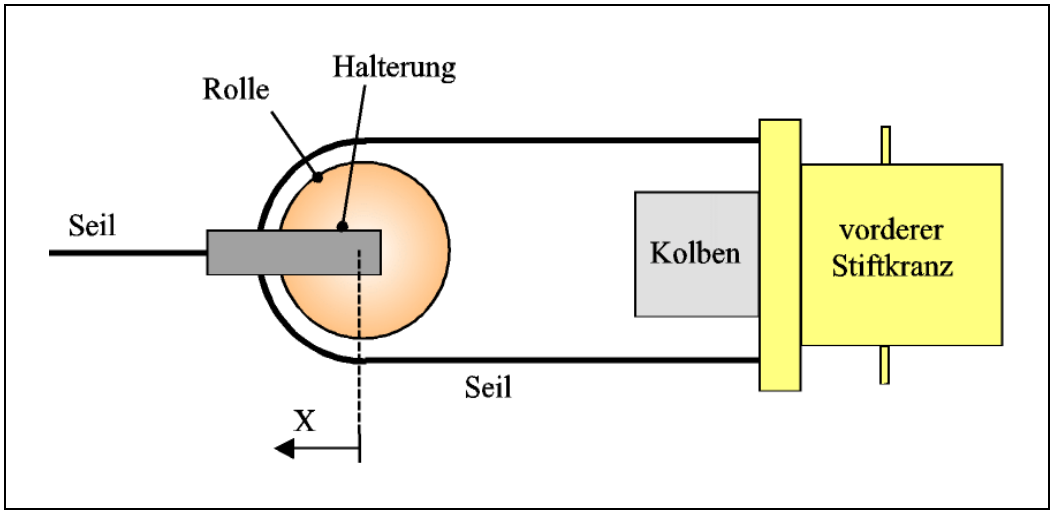


Bild 7.5 Kraftverteilung durch Umlenkrolle

In dieser Ausführung erfolgt eine selbständige Verteilung der Kräfte. Dazu ist allerdings ein ausreichender Rollendurchmesser von mindestens 150mm erforderlich. Zusammen mit der Befestigung der Rolle am Stahlseil wird die frei im Seil hängende Rolle zu schwer und damit das auf das Versuchsrohr wirkende Biegemoment zu groß. Zusätzlich ist die Rolle aufwendig in der Herstellung. Sie scheidet daher aus den weiteren Betrachtungen aus.

b) Verteilung der Kraft durch einen Querträger

Bei dieser Anordnung wird ein Querträger in das Stahlseil eingehängt, der die Verteilung der Kräfte übernimmt. Es wird im Gegensatz zur Umlenkrolle nicht automatisch eine gleichmäßige Kraftverteilung gewährleistet. Deshalb muss dafür gesorgt werden, dass der Abstand zwischen Querträger und Stiftkranz auf beiden Seiten gleich ist. Dazu werden zwei Gewindestangen eingesetzt, die eine definierte Einstellung des Abstandes ermöglichen. Es ergibt sich folgender Aufbau:

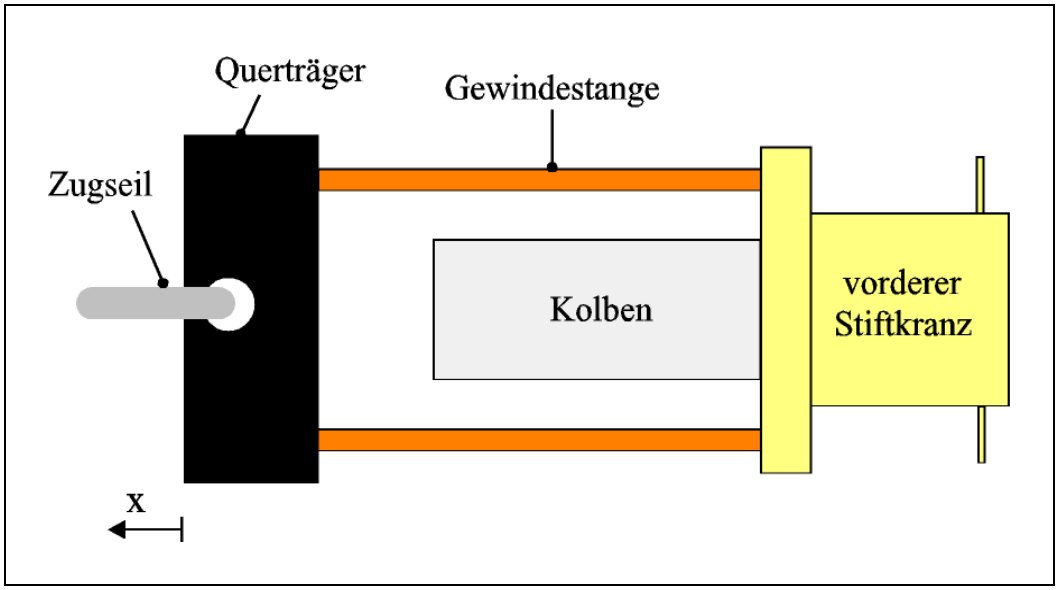


Bild 7.6 Kraftverteilung durch Querträger

Aufgrund des einfachen Aufbaus und des geringen Gewichtes kommt die zweite Variante zur Ausführung mit Kraftverteilung durch einen Querträger zur Ausführung.

Die endgültige Verbindung zwischen Zugseil und Stiftkranz ist in Bild 7.7 dargestellt.

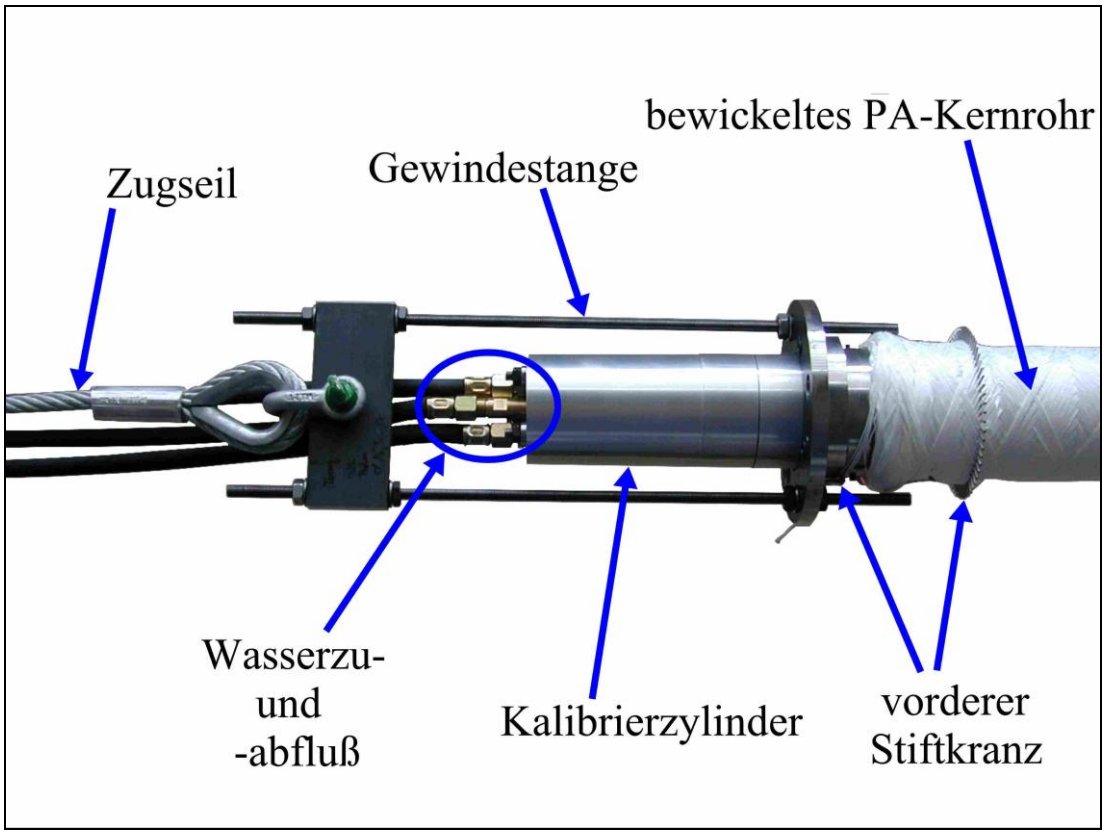


Bild 7.7 Krafteinleitung in den vorderen Stiftkranz

7.3 Stützen des Versuchsrohres

Auch bei geringem Eigengewicht belasten Zugvorrichtung und vorderer Stiftkranz das Versuchsrohr während des Versuches aufgrund eines größer werdenden Hebelarms mit einem zunehmenden Biegemoment (Bild 7.8). Dadurch kann sich das Rohr vor allem gegen Ende des Versuches verziehen.

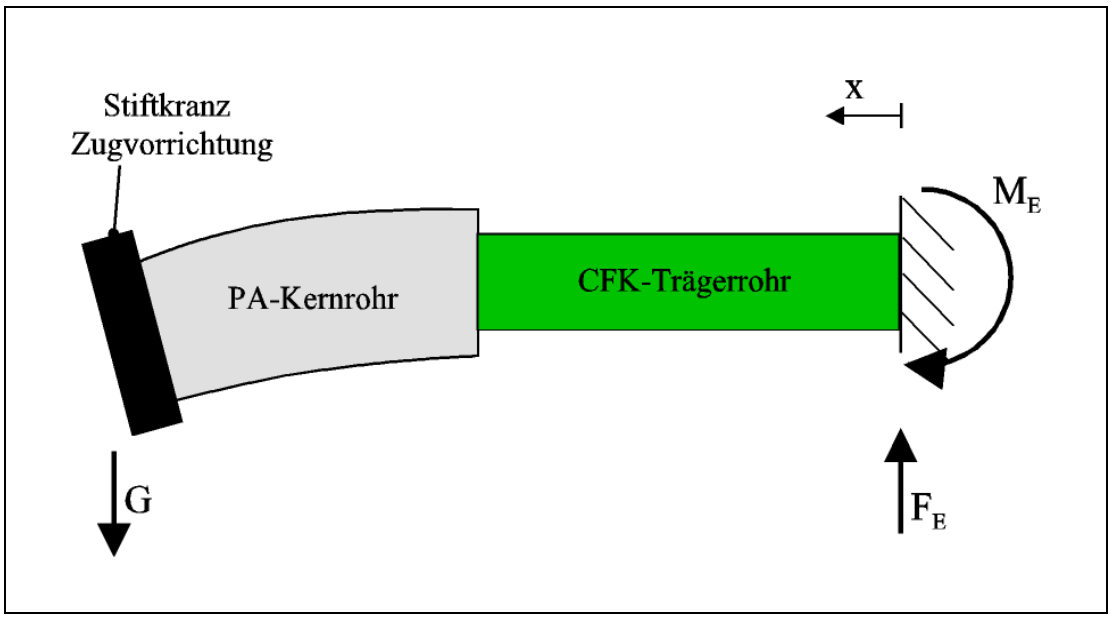


Bild 7.8 Entstehung des Biegemomentes

Um das zu verhindern, bieten sich zwei Möglichkeiten an:

a) Aufhängung
   Das Rohr wird über ein Seil in einer Schiene aufgehängt. Dabei muss die Aufhängung in der Schiene verschiebbar sein, um der Bewegung des Rohres folgen zu können.
   Die Aufhängung erfordert eine aufwendige Halterung oder eine Montage der Führung an der Decke.

b) Unterstützung:
   Das Rohr wird, nachdem es die Heizung verlassen hat, von unten unterstützt, um so das Gewicht von Stiftkranz und Zugvorrichtung abzufangen. Zur Unterstützung bietet sich ein Wagen an, der ähnlich wie die Heizung auf Rollen steht und so vom Rohr im Versuchsverlauf mitbewegt wird.

Die Entscheidung fällt zugunsten der Unterstützung, da sie einfacher zu realisieren ist. Dazu wird ein Wagen aus Mechanik-Elementen der Firma Bosch zusammengestellt, der folgendes Aussehen hat:



Bild 7.9 Wagen zur Unterstützung

Vor Versuchsbeginn steht der Wagen hinter der Heizung (Bild 7.10). Tritt das Rohr im Versuchsverlauf aus der Heizung aus, stützen sich Stiftkranz und Querträger auf dem Wagen ab und schieben ihn durch die Bewegung des Rohres von der Heizung weg.



Bild 7.10 Heizung und Wagen zur Unterstützung

8 Neukonstruktion der Wickelvorrichtung

8.1 Grundlagen

Die Wickelvorrichtung wird für den ersten Schritt des PAZ-Verfahrens, d.h. für die Bewicklung der Versuchsrohre benötigt. Sie muss zwei Aufgaben erfüllen:

- Aufspannen und Zentrieren des Kernrohres auf einer konventionellen Wickelmaschine, so dass es trocken mit dem Hybridroving bewickelt werden kann
- Schnittstelle zur Zugvorrichtung bilden um beim eigentlichen PAZ-Verfahren ein Einleiten der Zugkräfte in das Versuchsrohr zu ermöglichen

Eine Neukonstruktion ist erforderlich, da die alte Wickelvorrichtung aufgrund des vergrößerten Innendurchmessers der Kernrohre nicht mehr verwendet werden kann. Außerdem müssen Montage und Demontage im Zuge der Neukonstruktion vereinfacht werden.

Der prinzipielle Aufbau der Wickelvorrichtung wird aus der bisherigen V.E. übernommen:
Zur Bewicklung sitzt das Kernrohr zwischen zwei Stiftkränzen, die auf der Welle der Wickelmaschine zentriert sind. Einer der beiden Stiftkränze bleibt nach der Bewicklung fest mit dem Rohr verbunden und dient im Versuch der Einleitung der Zugkräfte in das Versuchsrohr. Da er während des Versuches über den Kolben gezogen wird, muss sein Innendurchmesser größer als der Kolbendurchmesser sein.

8.2 Detaillierte Umsetzung

Für einen möglichst einfachen Aufbau besteht die neue Wickelvorrichtung aus insgesamt 4 Teilen:

- 2 Stiftkränze
- 2 Zentrierzylinder

a) Stiftkränze
In Bild 8.1 ist der vordere Stiftkranz dargestellt. Die Stiftkränze sitzen bei der Bewicklung vor und hinter dem Kernrohr. Ihr Innendurchmesser ist ca. 2 mm größer als der Durchmesser des Kolbens im Aufweitbereich. Im Vergleich zu den Stiftkränzen in der bestehenden Versuchseinrichtung wird eine erhöhte Anzahl dünnerer Stifte eingesetzt, um bei dem verwendeten dünnen Roving eine gleichmäßigere Wicklung zu erreichen.

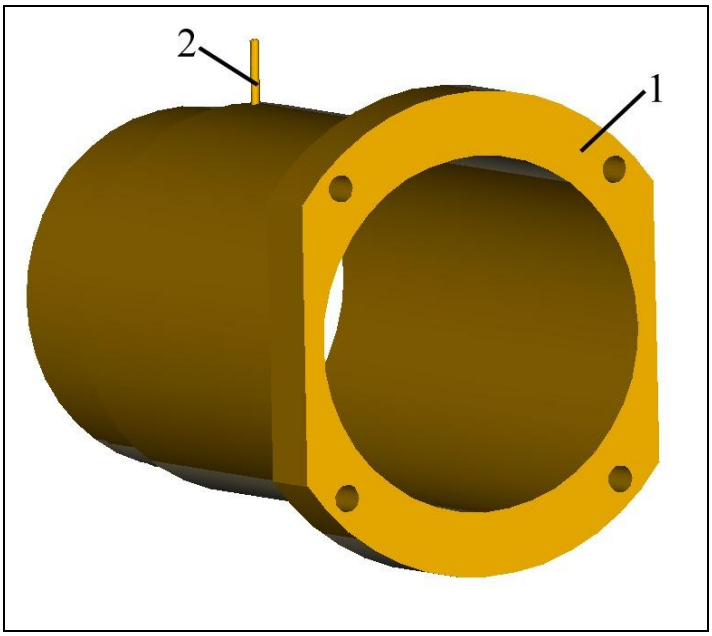


Bild 8.1 Vorderer Stiftkranz

Im Bild dargestellt ist der vordere Stiftkranz. Er hat einen Bund (1), an dem über einen Flansch die Abzugsvorrichtung angeschraubt wird. Der Abstand zwischen den Stiften (2) und dem Bund muss groß genug sein, um auch bei kleinen Wickelwinkeln ein Wenden der Wickelmaschine zu ermöglichen.

b) Zentrierzylinder
Die Zentrierzylinder sind aus Kunststoff gefertigt. Sie sitzen beim Wickelvorgang im Innern der Stiftkränze und zentrieren die Stiftkränze und das Kernrohr auf der Welle der Wickelmaschine.

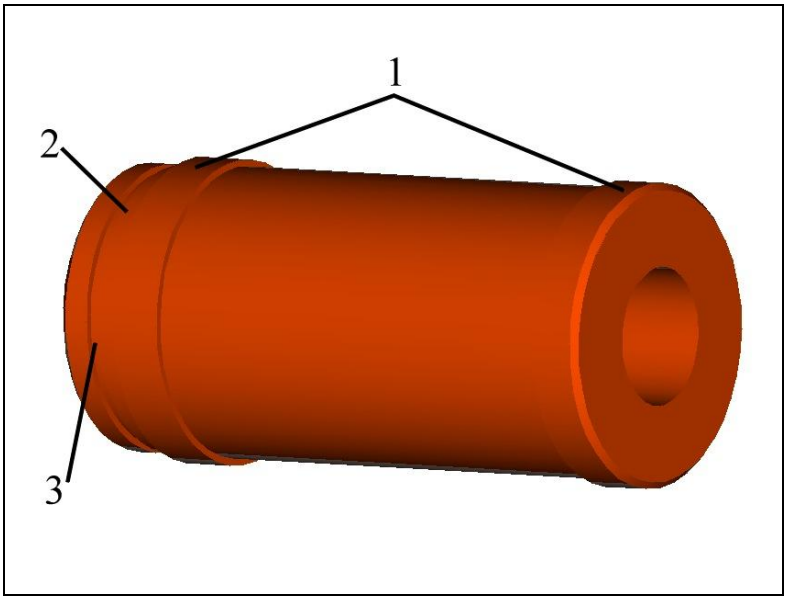


Bild 8.2 Vorderer Zentrierzylinder

Außen und innen befinden sich Schiebepassungen zum Stiftkranz und zur Welle. Die Passung zum Stiftkranz beschränkt sich auf zwei kurze Passflächen (1) vorne und hinten am Zentrierzylinder, wodurch Montage und Demontage vereinfacht werden.
Am Ende der Zentrierzylinder befindet sich ein Absatz (2), auf den das Kernrohr aufgeschoben wird. Ein O-Ring (3) gleicht die Abweichungen des Kernrohres aus und befestigt es verdrehsicher auf dem Zentrierzylinder.

Die Befestigung der Einzelteile erfolgt durch Klemmung mittels Madenschrauben. Die Madenschrauben, die die Zentrierzylinder auf der Welle befestigen, sind durch Bohrungen in den Stiftkränzen auch im montierten Zustand zugänglich.

Es ergibt sich folgender Gesamtaufbau der Wickelvorrichtung:

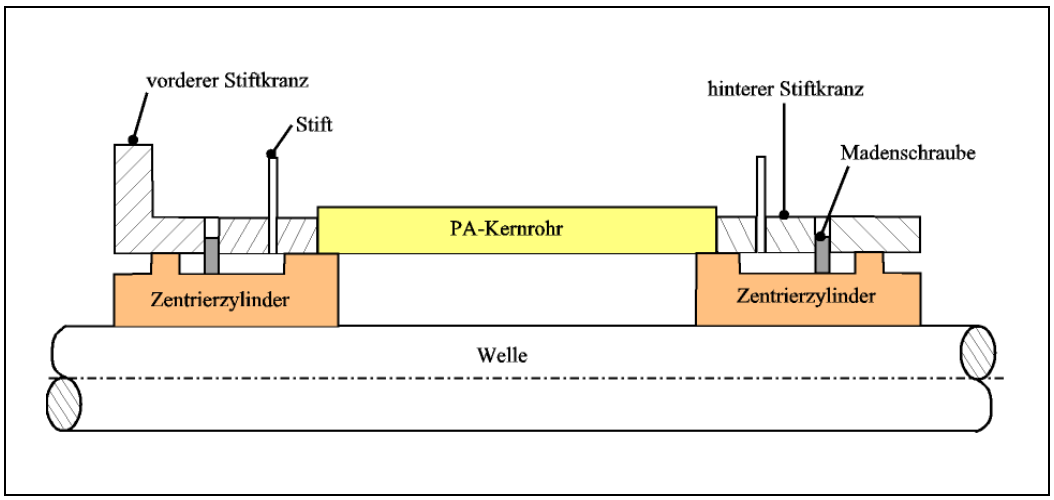


Bild 8.3 Schnitt durch die Wickelvorrichtung

9 Gesamtaufbau und Versuchsablauf

Nach Abschluß der Konstruktion und der Montage der einzelnen Elemente müssen sie zum eigentlichen Versuchsstand zusammengesetzt werden (siehe Kapitel Gesamtmontage im Anhang). Der Aufbau erfolgt auf zwei Nutenplatten. Auf der einen (Bild 9.1) wird der Kolben mit der Führung für die Kolbenstange, auf der anderen (Bild 9.2) die Halterung für das Trägerrohr und damit für den Kolben jeweils in der richtigen Höhe befestigt. Die Heizung und der Wagen zur Unterstützung des Versuchsrohres befinden sich zwischen den beiden Nutenplatten, wie in Bild 9.3 zu erkennen ist.

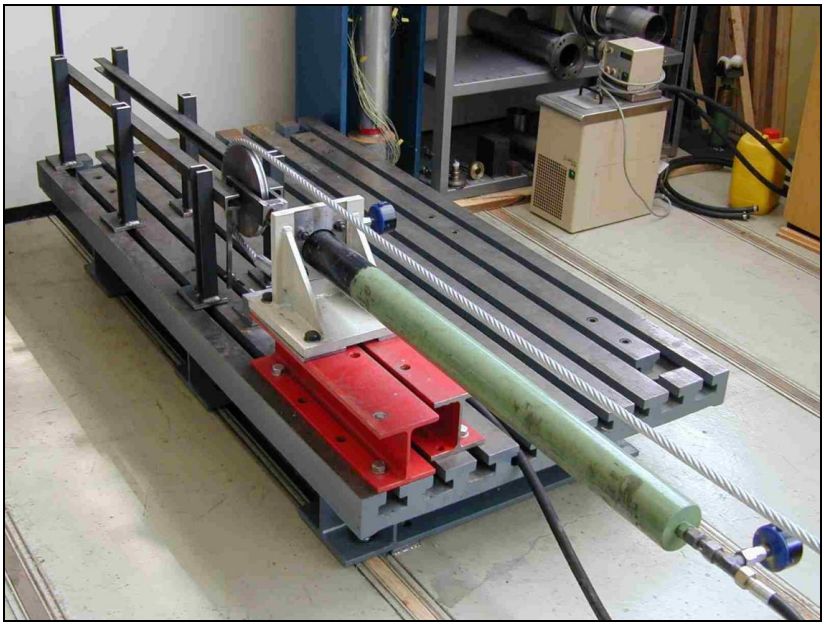


Bild 9.1 Versuchsstand (linke Seite)

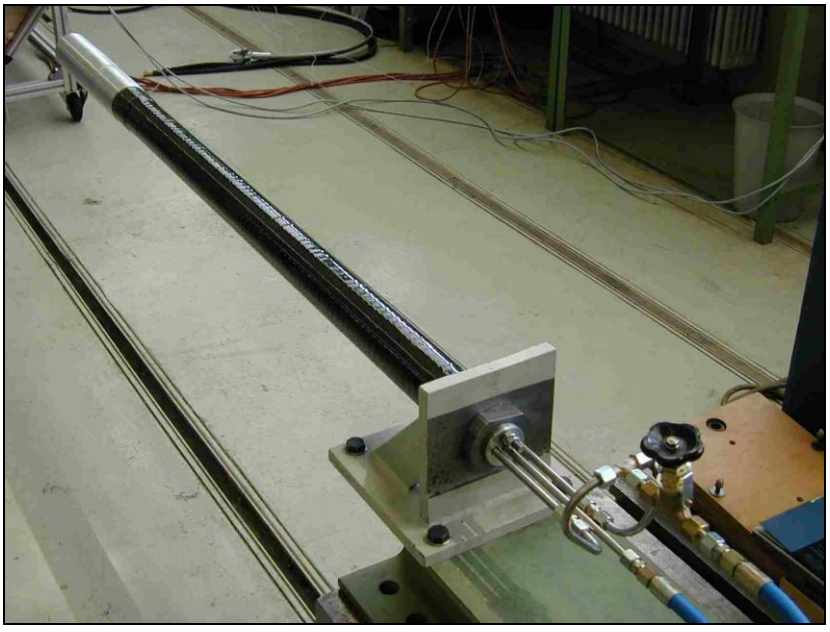


Bild 9.2 Versuchsstand (rechte Seite)



Bild 9.3 Gesamtaufbau

Für die eigentliche Versuchsdurchführung wird das Versuchsrohr auf das Trägerrohr aufgeschoben. Die Zugvorrichtung wird angebracht, wobei Stahlseil und Kühlschläuche durch die Heizung verlaufen.
Die Bilder 9.4 und 9.5 zeigen den betriebsbereiten Versuchsstand.

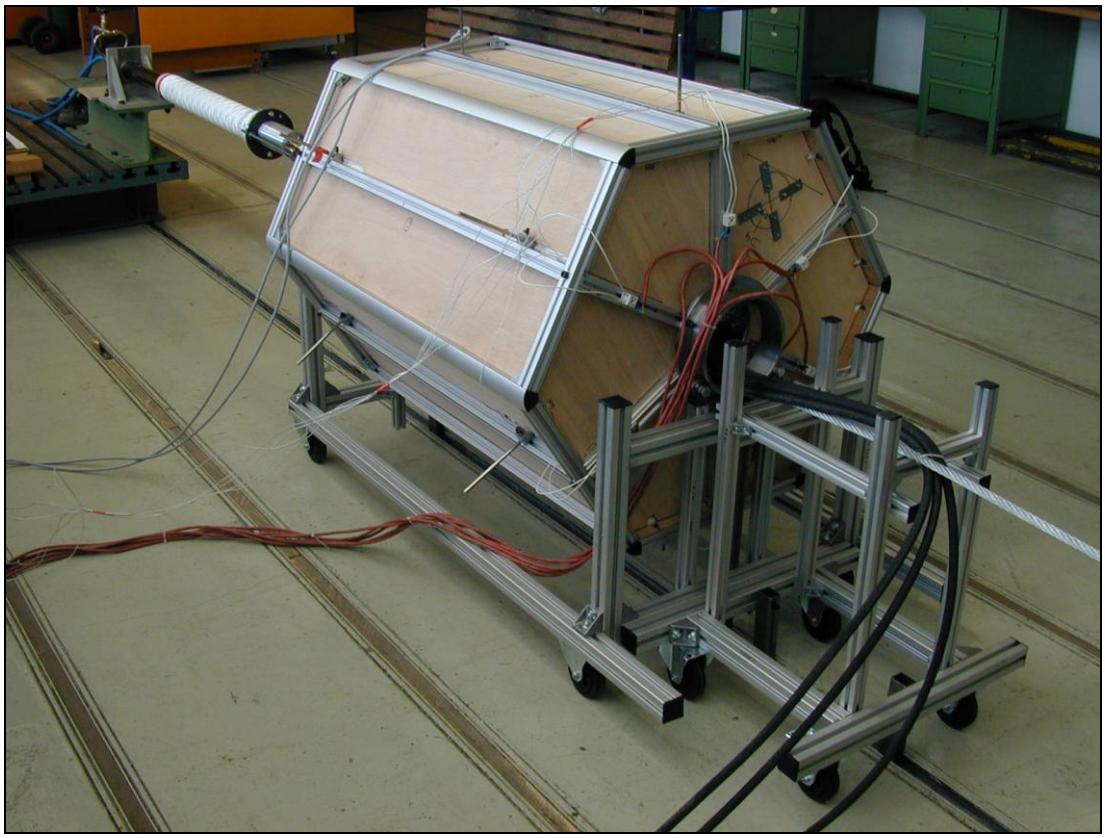


Bild 9.4 Versuchsstand, betriebsbereit (Vorderansicht)

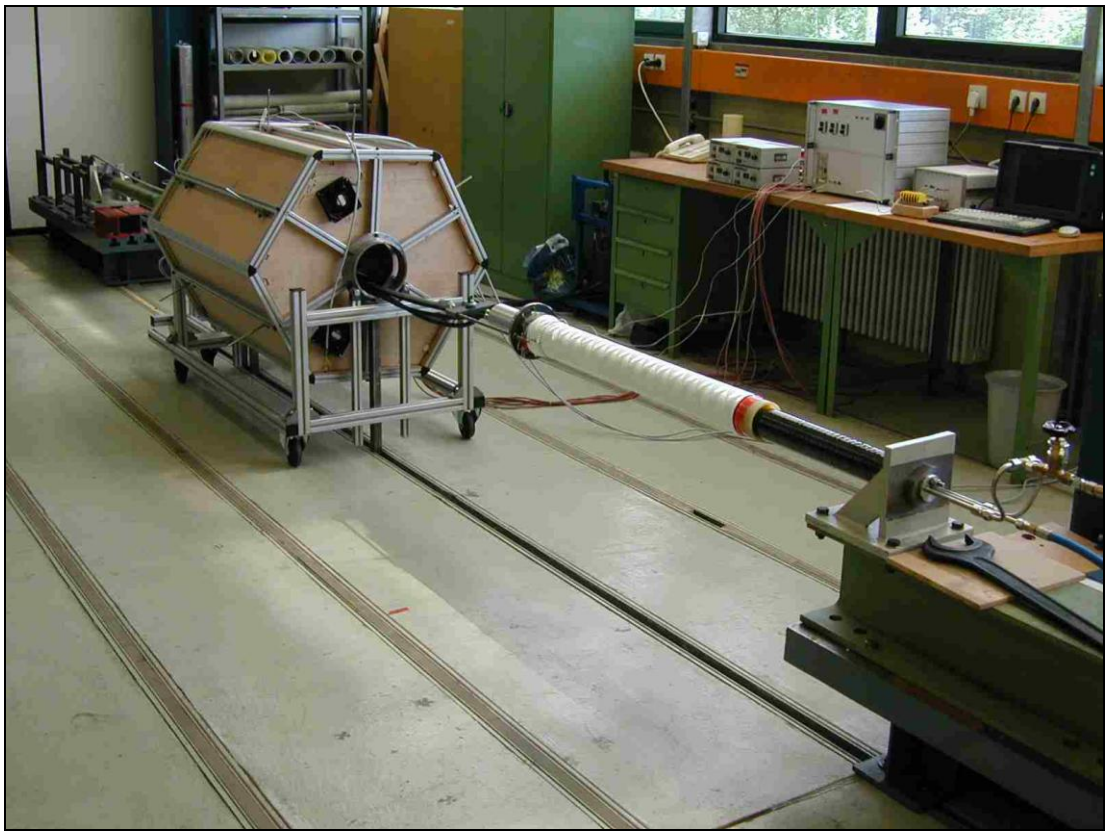


Bild 9.5 Versuchsstand, betriebsbereit (Rückansicht)

Für die eigentliche Versuchsdurchführung wird die Heizung eingeschaltet und langsam über das Versuchsrohr geschoben. Hat sie ihre endgültige Position erreicht, wird das Rohr mit Hilfe des Hydraulikzylinders über den Kolben gezogen und dabei vom Wagen unterstützt. Der Versuch ist beendet, wenn das Rohr komplett über den Kolben gezogen wurde.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Profil-Armierungs-Ziehen (PAZ) dient der kontinuierlichen Fertigung rohrförmiger FKV mit thermoplastischer Matrix. Ein mit einer Hybridfaserwicklung belegtes thermoplastischer Kernrohr wird an seiner Außenseite aufgeschmolzen. Der flüssige Thermoplast wird durch eine Aufweitung des Kernrohres radial nach außen in die Wicklung gedrückt. Nach dem Abkühlen entsteht ein fertiges Verbundrohr.

Die mit der bestehenden Versuchseinrichtung (V.E.) erzielten Ergebnisse zeigen, daß im PAZ-Verfahren die kontinuierliche Fertigung rohrförmiger FKV möglich ist.
Eine Analyse der bestehenden Versuchseinrichtung ergibt, dass Qualitätsprobleme bei den gefertigten Rohren vor allem in der mangelhaften konstruktiven Umsetzung des Verfahrens begründet liegen. Eine Kontaktheizung über eine Außenkokille ist mit einer mechanischen Aufweitung durch einen Kolben kombiniert. Der Durchtritt der Versuchsrohre durch einen unveränderlichen Ringspalt (Ringspaltproblem) sowie eine unzureichende Kontrolle des radialen Temperaturverlaufes (Temperierungsproblem) erweisen sich als die Hauptschwachpunkte. Sie werden im Rahmen der Neukonstruktion beseitigt.

Dazu wird die Gesamtfunktion des PAZ-Verfahrens in Teilfunktionen zerlegt, wobei sich Kompaktierung und Stabilisierung als Hauptfunktionen erweisen. Die Suche nach alternativen Wirkprinzipien für die Umsetzung der Hauptfunktionen führt auf zwei mögliche Gesamtlösungen.
Ein Bewertungsschema läßt eine Variante mit hydraulischer Aufweitung und Kontaktheizung aufgrund von Dichtungsproblemen aus den weiteren Betrachtungen ausscheiden.
Zur Ausführung kommt eine mechanische Aufweitung durch einen Kolben, die mit einer berührungslosen Strahlerheizung kombiniert wird. Auf einen Ringspalt wird verzichtet und das Temperierungsproblem durch Einsatz eines leistungsstarken Temperierungsgerätes gelöst.

Im Rahmen der Neukonstruktion werden fünf Hauptfunktionsträger entwickelt, die zum Gesamtversuchsstand zusammengesetzt werden. Dabei handelt es sich um:

- Kolben
- Trägerrohr
- Strahlerheizung
- Abzugsvorrichtung
- Wickelvorrichtung

Besonderes Augenmerk wird auf die Konstruktion von Kolben und Heizung gelegt. Der Kolben ist modular aufgebaut und in einen temperierter Aufweitbereich mit nachgeschaltetem gekühlten Kalibrierbereich gegliedert. Aufweitdurchmesser und Schrumpfdurchmesser werden so genau wie möglich berechnet und die Berechnung in einer leicht verständlichen EDV-Anwendung implementiert.
Bei der Heizung werden aufgrund mangelnder Erfahrungswerte mit Infrarot-Strahlerheizungen zahlreiche geometrische Verstellmöglichkeiten vorgesehen, so dass die Position der Infrarotstrahler relativ zum Kolben bzw. zum Versuchsrohr variiert werden kann.

Nach Abschluß der Gesamtmontage sind Versuche mit der neuen Versuchseinrichtung durchzuführen. Vorbereitend muss die optimale Position der Strahler relativ zum Kolben im Rahmen einer Parameterstudie ermittelt werden. Im nächsten Schritt sind Heizleistung und Vorschub aufeinander abzustimmen. Eine Variation der Geometrie des Aufweitbereiches zur Anpassung an gewonnene Versuchsergebnisse ist durch Austausch einzelner Elemente des Kolbens jederzeit möglich.

Nach Klärung sämtlicher Parameter kann damit begonnen werden, die im jetzigen Versuchsstadium getrennten Schritte des PAZ-Verfahrens, d.h. die Bewicklung der Kernrohre und die Herstellung des eigentlichen Verbundes, in einem kombinierten Prozeß zu vereinigen. Dies erfordert eine Überarbeitung der Konstruktion des Kolbens, da sämtliche Anschlüsse auf die Seite des Trägerrohres verlegt werden müssen.
Mit einem solchen kombinierten Prozess ist die angestrebte Serienfertigung von Verbundrohren im PAZ-Verfahren möglich.

6 Neukonstruktion der Heizung 49

6.1 Auswahl des Heizverfahrens 49
6.1.1 Anforderungen an das Heizverfahren 49
6.1.2 Mögliche Lösungen und Verfahrensauswahl 49

6.2 Konstruktion der Heizungsaufnahme 53
6.2.1 Anforderungen an die Heizungsaufnahme 53
6.2.2 Konstruktive Umsetzung 54

7 Neukonstruktion der Abzugsvorrichtung 60

7.1 Krafterzeugung 60

7.2 Kraftleitung 60
7.2.1 Verbindung zwischen Hydraulikzylinder und Stahlseil 60
7.2.2 Verbindung zwischen Stahlseil und Versuchsrohr 64

7.3 Stützen des Versuchsrohres 68

8 Neukonstruktion der Wickelvorrichtung 70

8.1 Grundlagen 70

8.2 Detaillierte Umsetzung 70

9 Gesamtaufbau und Versuchsablauf 73

10 Zusammenfassung und Ausblick 76

11 Anhang

11.1 Technische Daten

a) Kernrohr

Werkstoff: Polyamid (PA)
Copolymeriserat aus PA6 und PA12
Innenseite: 3,5mm PA6
Außenseite: 1,5mm PA12
Oberfläche: Innen- und Außenoberfläche überdreht
Dichte: $\rho_{PA6} = 1{,}15 \frac{g}{cm^3}$

$\rho_{PA12} = 1{,}02 \frac{g}{cm^3}$

Geometrische Daten:

Die geometrischen Werte wurden anhand der vier gelieferten Rohre ermittelt. Die Berechnung der Mittelwerte der Durchmesser und deren Standardabweichung liegt in der Excel-Datei [Messergebnisse der gelieferten Rohre.xls] vor.

Innendurchmesser:	83,94	±	0,39 mm
Außendurchmesser:	94,40	±	0,30 mm
Wanddicke:	5,23	±	0,46 mm

Thermische Eigenschaften:

Thermischer Ausdehnungskoeffizient: $\alpha_{PA6}(23°C) = \alpha_{PA12}(23°C) = 10 \times 10^{-5} \frac{1}{K}$

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_{PA6}(23°C) = \lambda_{PA12}(23°C) = 0{,}24 \frac{W}{mK}$
(bei steigender Temperatur nimmt λ ab)

Kristallitschmelzbereich:	PA6	: 215°C
	PA12	: 200°C
Schmelztemperatur:	PA6	: 200°C
	PA12	: 180°C

Mechanische Eigenschaften:

$E_{PA6}(20°C) = 2000 Nmm^{-2}$
$E_{PA6}(140°C) = 250 Nmm^{-2}$
$G_{PA6}(20°C) = 1100 Nmm^{-2}$
$G_{PA6}(50°C) = 630 Nmm^{-2}$
$G_{PA6}(100°C) = 180 Nmm^{-2}$ ist bis ca. 170°C konstant und dann mit einem linearen Abfall bis auf $G_{PA6}(220°C) = 0\ Nmm^{-2}$

$\nu_{PA6} = 0{,}46$

$E_{PA12}(20°C) = 1800 Nmm^{-2}$
$G_{PA12}(20°C) = 470 Nmm^{-2}$
$G_{PA12}(50°C) = 250 Nmm^{-2}$,dann konstant bis t=150°C
$G_{PA12}(165°C) \approx 0 Nmm^{-2}$

b) Wicklung:

Faserdaten:

Werkstoff: Hybridroving PA12 / E-Glas

Filamentdicke: PA12 –Fasern: 20-25 µm

E-Glasfasern: 17 µm

Faservolumenanteil: $\varphi_{Gf} = 0{,}32$

Luftanteil in der Wicklung: $\varphi_L = 0{,}5$

Dichte: $\rho_{Gf} = 2{,}54 \frac{g}{cm^3}$

$\rho_{PA12} = 1{,}02 \frac{g}{cm^3}$

Thermische Eigenschaften:

Schmelztemperatur E-Glas: 700°C

Thermischer Ausdehnungskoeffizient: $\alpha_{Gf} = 5 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$

$\alpha_{PA12}(23°C) = 10 \times 10^{-5} \frac{1}{K}$

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_{Gf}(23°C) = 1{,}0 \frac{W}{mK}$

$\lambda_{PA12}(23°C) = 0{,}24 \frac{W}{mK}$

Hinweis: Solange die PA-Fasern in der Wicklung noch nicht aufgeschmolzen sind, ist die Gesamtwärmeleitfähigkeit aufgrund der mit Luft gefüllten Zwischenräume sehr schlecht.

Mechanische Eigenschaften:

E_{Gf} (t=20°C) = 73000Nmm^{-2}

E_{Gf} (t=200°C) ≈ 65000Nmm^{-2}

E_{PA12} (20°C) = 1800Nmm^{-2}

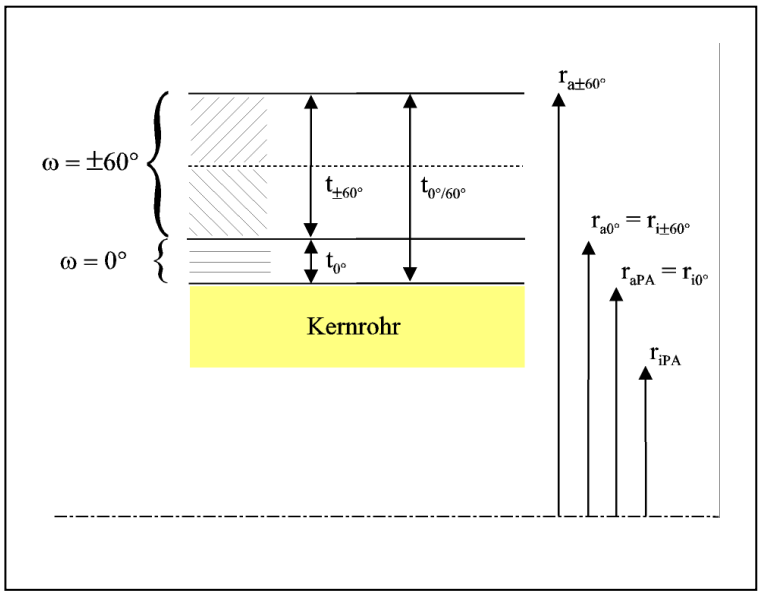
R_{mGf} = 3500Nmm^{-2} mit einem starken Abfall ab 200°C (R_{mGF}(500°C) = 1500 Nmm^{-2})

11.2 Rechnungen

Beim PAZ-Verfahren mit mechanischer Rohraufweitung stellen die Durchmesser des Kolbens im Aufweitbereich und im Kalibrierbereich die entscheidenden geometrischen Größen für den Erfolg des Verfahrens dar. Sie müssen im Rahmen der Kolbenauslegung so genau wie möglich berechnet werden.
Die Berechnung des Aufweitdurchmesser erfolgt in der Aufweitungsrechnung. Im Aufweitbereich hat noch keine Kompaktierung stattgefunden und die Fasern liegen ungestützt an der Außenseite des Kernrohres auf. Ausgangspunkt für die Aufweitungsrechnung ist daher die Netztheorie [13].
Der Kolbendurchmesser im Kalibrierbereich wird in der Schrumpfrechnung bestimmt. Unterhalb der Erstarrungstemperatur der Matrix liegt im Kalibrierbereich ein kompaktiertes Verbundrohr vor, weshalb die Berechnung nach CLT [13] erfolgt.
Nach der Festlegung der Kolbendurchmesser sind im letzten Teil der Rechnung die benötigten Abzugskräfte überschlägig zu berechnen.
Aufweitungs- und Schrumpfrechnung liegen in übersichtlicher Form als Exceldatei [Gesamtberechnung.xls] vor.

11.2.1 Berechnung der Aufweitung

Die Aufweitungsrechnung basiert auf einer netztheoretischen Betrachtung der Hybridfaserwicklung. Diese besteht aus einem Hybridroving aus E-Glas und PA12 mit den in Kapitel 11.1 beschriebenen Eigenschaften. Die Wicklung ist auf eine kombinierte Belastung aus Zug und Innendruck ausgelegt und weist einen dreischichtigen Aufbau auf. (Bild 11.1).



Schichtdicken:
$t_{0°}$ = 0,6mm
$t_{\pm 60°}$ = 1,8mm
$t_{0°/60°} = t_{0°} + t_{\pm 60°}$
= 2,4mm

Radien:
r_{iPA} = 41,97mm
$r_{aPA} = r_{i0°}$ = 47,2mm
$r_{a0°} = r_{i\pm 60°}$ = 47,8mm
$r_{a\pm 60°}$ = 49,6mm

Bild 11.1 Darstellung der Schichtdicken und Radien

Direkt auf dem Kernrohr liegt eine 0°-Schicht mit einer Schichtdicke von $t_{0°}$ = 0,6mm. Da diese mit fachgebietseigenen Mitteln nicht hergestellt werden kann, wird sie bei der Bewicklung der Versuchsrohre durch einen AWV mit $\omega = \pm 10°$ ersetzt. Im Rahmen der Rechnung wird dieser AWV als einzelne 0° Schicht betrachtet. Der dadurch begangene Fehler ist vernachlässigbar.
Über der 0° Schicht liegt an der Außenseite des Versuchsrohres ein AWV mit $\omega = \pm 60°$ und einer Schichtdicke von $t_{\pm 60°}$ = 1,8mm. Die Wicklung hat damit eine Gesamtdicke von $t_{0°/60°}$ = 2,4 mm. Der Faservolumenanteil der Hybridfaser wird im Veraschungsversuch zu φ_{Gf} =0,32. bestimmt. Ferner wird angenommen, dass nach der trockenen Bewicklung ein Luftanteil von φ_L=0,50 in der Wicklung verbleibt.

Über die Höhe der mechanischen Belastungen der Wicklung und ihre Verteilung auf die einzelnen Schichten werden folgende Annahmen gemacht:

- Für eine vollständige Tränkung der außen liegenden Fasern wird ein Tränkungsdruck von 10 bar als ausreichend angesehen [2]. Dieser Druck muss durch die Aufweitung zwischen dem Kernrohr und der Wicklung aufgebaut werden und ist damit die Ausgangsbasis für die gesamte Aufweitungsrechnung.
- Aufgrund der bisherigen Versuchsergebnisse [16] wird von einer benötigten Abzugskraft von $F_{Zugkraft}$ =3 kN ausgegangen, die in axialer Richtung auf die Wicklung wirkt. Diese Annahme muss durch die abschließende Berechnung der Abzugskräfte verifiziert werden.
- Der Tränkungsdruck entspricht einem Innendruck, der auf die Wicklung wirkt. Er wird aufgrund der radialen Nachgiebigkeit der 0° Schicht komplett vom außen liegenden AWV mit $\omega = \pm 60°$ aufgenommen
- Die Abzugskraft $F_{Zugkraft}$ wird mit Hilfe des vorderen Stiftkranzes in die Wicklung eingeleitet und durch Reibung auf das Kernrohr übertragen.
- In radialer Richtung kann die 0° Schicht keine Kräfte übernehmen und setzt deshalb einer Aufweitung durch den Kolben keinen Widerstand entgegen.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen wird davon ausgegangen, dass sich die zur vollständigen Kompaktierung des Versuchsrohres benötigte Gesamtaufweitung aus 4 Anteilen zusammensetzt (Bild 11.2). Dies sind:

a) Aufweitung der Wicklung durch den Tränkungs- bzw. Innendruck von 10 bar (Δr_{mech}, im Bild 11.2 blau dargestellt). Dabei setzt sich Δr_{mech} aus der Aufweitung der 0° Schicht ($\Delta r_{0°}$) und Aufweitung des AWV ($\Delta r_{\pm 60°}$) zusammen. Es gilt:

$$\Delta r_{mech} = \Delta r_{0°} + \Delta r_{\pm 60°}$$

b) Aufweitung des Kernrohres um genügend flüssiges PA zur vollständigen Verdrängung der Luft in die Wicklung zu pressen (Δr_{PA}, im Bild 11.2 braun dargestellt)
c) Aufweitung zur Kompensation der thermischen Dehnung der Glasfasern (Δr_T, im Bild 11.2 grün dargestellt)
d) Dickenänderung des Kernrohres infolge der mechanischen Belastung ($\Delta r_{Kernrohr}$, im Bild 11.2 gelb dargestellt)

Die einzelnen Anteile werden getrennt berechnet und zur Gesamtaufweitung Δr_{ges} aufaddiert. Die getrennte Berechnung ermöglicht einen Vergleich der absoluten Größen der vier Anteile.
Wichtig ist, dass zwischen den einzelnen Anteilen an der Gesamtaufweitung Abhängigkeiten bestehen. Einen Überblick über die Zusammenhänge liefert folgendes Schaubild:

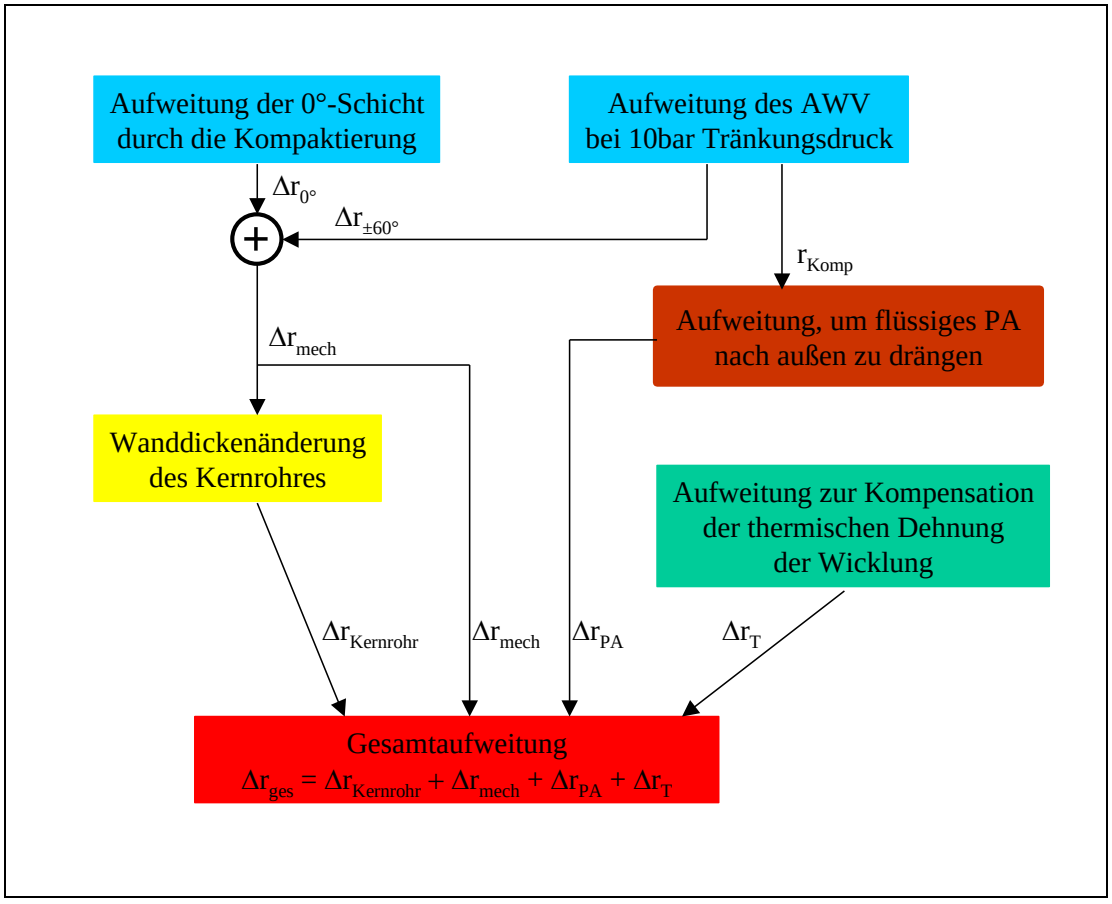


Bild 11.2 Überblick über die Aufweitungsrechnung

Wichtig für das Verständnis der Rechnung ist vor allem der Zusammenhang zwischen der mechanischen Aufweitung Δr_{mech} der Wicklung durch den Tränkungsdruck (blau) und der benötigten Aufweitung Δr_{PA} zur vollständigen Verdrängung der Luft aus der Wicklung (braun). Er wird durch den Kompaktierungsradius r_{komp} hergestellt und bedarf einer ausführlichen Erläuterung:

Wird die Wicklung von innen unter Druck gesetzt, kommt es zur Verdrängung der Luft aus der 0° Schicht. Diese kann in radialer Richtung keine Kräfte aufnehmen, so dass unter 10 bar Innendruck von einer vollständigen Kompaktierung ausgegangen wird. Damit verringert sich bei einem Luftanteil $\varphi_L = 0{,}5$ die Dicke der 0° Schicht um die Hälfte. Die benötigte Aufweitung beträgt $\Delta r_{0°} = \varphi_L \cdot t_{0°}$, was folgender Skizze entnommen werden kann:

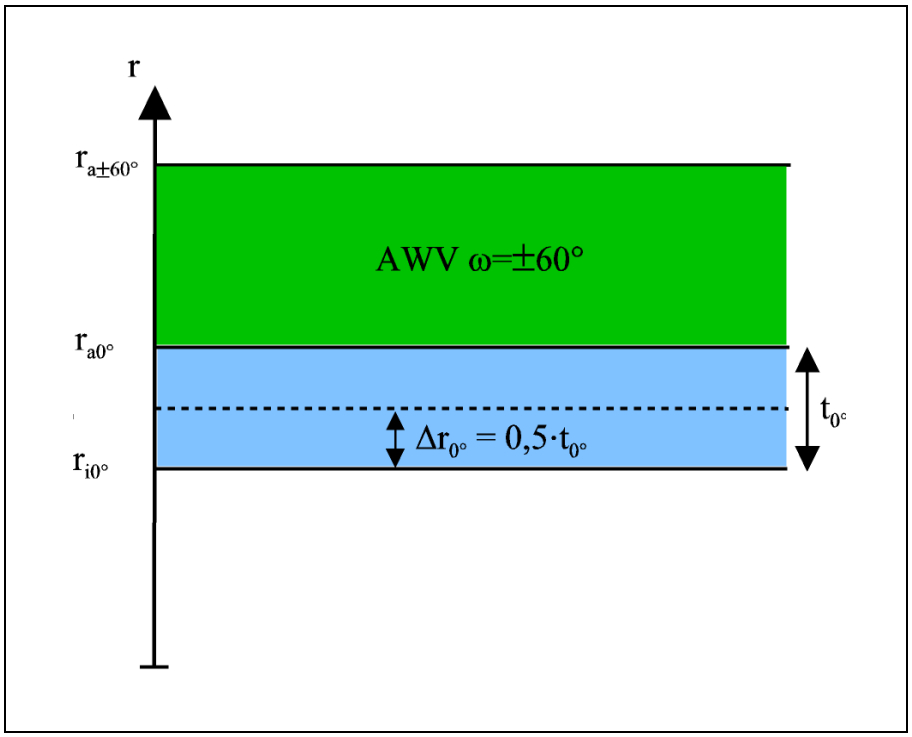


Bild 11.3 Kompaktierung der 0°-Schicht

Nach der Kompaktierung der 0°-Schicht gerät der außen liegende AWV unter Innendruck. Aufgrund der enthaltenen Luft und der elastischen PA Fasern partizipieren nicht alle Fasern gleichmäßig an der Lastaufnahme. Zunächst werden nur die Fasern gedehnt, die an der Innenseite des AWV liegen. Ihre Dehnung nimmt mit steigendem Druck zu, so dass erst nach und nach die außen liegenden Fasern an der Lastaufnahme teilnehmen.
Der (Tränkungs-)Druck von 10 bar an der Innenseite des AWV mit ω = ±60° stellt im Vergleich zur Festigkeit des auf Innendruck ausgelegten AWV nur eine geringe Belastung dar. Sie wird vollständig von den inneren Schichten aufgenommen. Nur in diesen inneren Schichten liegende Glasfasern werden gedehnt, die außen liegenden bleiben unbelastet.
Der Radius, bei dem die letzten Glasfasern liegen, die sich noch an der Lastaufnahme beteiligen, wird als Kompaktierungsradius r_{komp} bezeichnet. Die Bezeichnung rührt aus der idealisierten Annahme, dass sich weiter außen liegende Glasfasern erst dann an der Lastaufnahme beteiligen, wenn in allen tiefer liegenden Schichten die Luft vollständig verdrängt wurde, die tieferen Schichten also kompaktiert sind.
Eine Verdrängung von Luft aus der Wicklung durch radial nach außen gepresstes PA muss unter dieser Annahme nur in Schichten erfolgen, die jenseits des Kompaktierungsradius liegen. Dieser hat damit entscheidenden Einfluß auf die Größe des Anteils (b) an der Gesamtaufweitung und muss möglichst genau ermittelt werden.

Zur Berechnung des Kompaktierungsradius wird iterativ vorgegangen. Das Vorgehen wird im Folgenden erläutert. Die hochgestellten Ziffern (n) beziehen sich jeweils auf den n-ten Iterationsschritt.
Vorausgesetzt wird, dass die 0°-Schicht kompaktiert ist und dass 10 bar Tränkungsdruck an der Innenseite des AWV aufgebaut werden sollen. Die Dicke der Wicklung ist klein im Vergleich zum Rohrdurchmesser (t << r), so dass die Krümmung der Oberfläche vernachlässigt und auf eine ebene Betrachtungsweise übergegangen werden kann.

Es ergibt sich folgendes Bild:

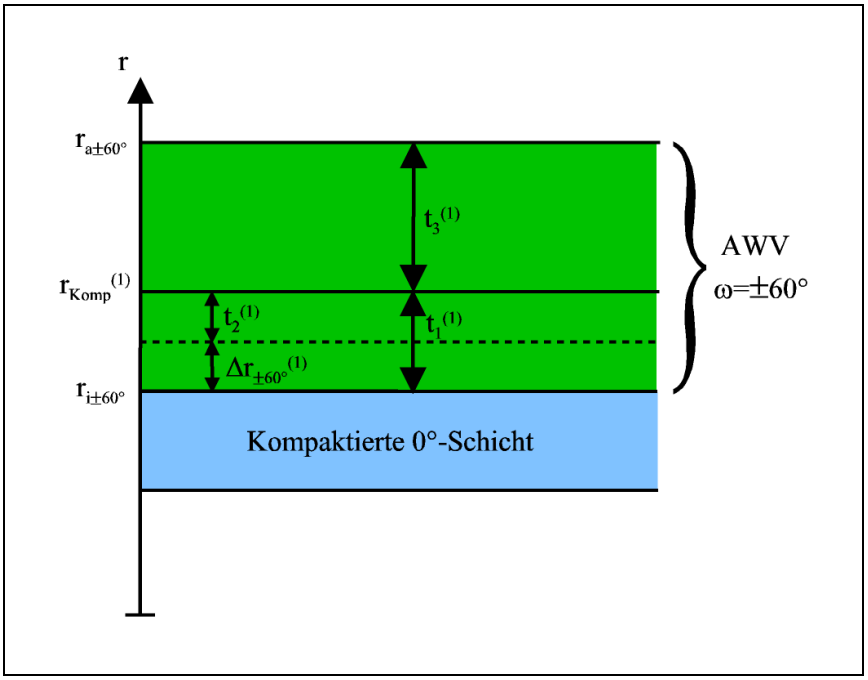


Bild 11.4 Darstellung des Kompaktierungsradius

Man erkennt die kompaktierte 0°-Schicht und den AWV mit ω = ±60° (Innenradius $r_{i\pm60°}$, Außenradius $r_{a\pm60°}$).

Im ersten Schritt der Berechnung wird für den AWV mit der Schichtdicke $t_{\pm60}$ die Aufweitung unter 10 bar Innendruck mit Hilfe der Netztheorie bestimmt. Das Ergebnis ist eine zugehörige Faserdehnung bzw. radiale Aufweitung von $\Delta r_{\pm60°}^{(1)}$, die entsprechend den Annahmen der Netztheorie über der Dicke des AWV konstant ist. Sie fällt für die inneren Fasern zu gering aus, für die äußeren ist sie zu groß, da die Belastungen über der Dicke inhomogen verteilt sind und von innen nach außen abnehmen.

Zur Bestimmung des Kompaktierungsradius aus der radialen Aufweitung $\Delta r_{\pm60°}^{(1)}$ wird die ermittelte Dehnung im Widerspruch zu den Annahmen der Netztheorie nur an den innen liegenden Fasern des AWV aufgebracht. Der Außenradius der Wicklung bleibt unverändert.

Wird unter diesen Voraussetzungen der Innenradius $r_{i\pm60°}$ durch die Aufweitung um $\Delta r_{\pm60°}^{(1)}$ nach außen verschoben, wird durch die Verdrängung der Luft ein Anteil von $t_1^{(1)}$ des AWV kompaktiert. Bei einem Luftanteil von $\varphi_L = 50$ % entspricht $t_1^{(1)}$ gerade der doppelten Aufweitung $(t_1^{(1)} = \frac{\Delta r_{\pm60°}^{(1)}}{\varphi_L} = 2 \cdot \Delta r_{\pm60°}^{(1)})$.
Die Dicke des kompaktierten Anteils $t_1^{(1)}$ reduziert sich nach der Kompaktierung auf $t_2^{(1)}$ mit $t_2^{(1)} = (1-\varphi_L) \cdot t_1^{(1)} = \Delta r_{\pm60°}^{(1)}$.
Der Kompaktierungsradius r_{komp} lässt sich bestimmen aus $r_{komp} = r_{i\pm60°} + t_1^{(1)}$.

An der Außenseite des AWV verbleibt eine nicht kompaktierte Schicht mit der Dicke $t_3^{(1)}$. Es gilt $t_3^{(1)} = r_{a\pm60°} - r_{Komp}^{(1)}$.

Der in diesem ersten Schritt bestimmte Kompaktierungsradius $r_{Komp}^{(1)}$ fällt zu gering aus, da für seine Ermittlung die Belastung gleichmäßig auf alle Fasern verteilt wird. Die stärkere Dehnung der Fasern an der Innenseite des AWV beibt unberücksichtigt.

Zur Verbesserung des Ergebnisses wird im zweiten Iterationsschritt von einem virtuellen AWV mit einer gegenüber dem realen AWV reduzierten Gesamtschichtdicke von $t_{it}^{(2)}$ ausgegangen (die Ausgangsschichtdicke $t_{\pm60°}$ kann als $t_{it}^{(1)}$ betrachtet werden). Der Außendurchmesser der virtuellen Wicklung reduziert sich auf $r_{a\pm60°}^{(2)}$.
Für diesen virtuellen AWV wird die Aufweitung unter den oben beschriebenen Annahmen erneut berechnet. Aufgrund der Implementierung der Rechnung in einer Excel-Datei bedeutet dies keinen Mehraufwand. Das Ergebnis ist eine neue radiale Aufweitung von $\Delta r_{\pm60°}^{(2)}$ bzw. ein neuer Kompaktierungsradius $r_{komp}^{(2)}$. Aufgrund der geringeren Ausgangsschichtdicke $t_{it}^{(2)}$ fällt $\Delta r_{\pm60°}^{(2)}$ größer aus als $\Delta r_{\pm60°}^{(1)}$. Damit ist auch der zu $\Delta r_{\pm60°}^{(2)}$ gehörende Kompaktierungsradius $r_{komp}^{(2)}$ größer als $r_{komp}^{(1)}$. Die Dicke $t_3^{(2)}$ des nicht kompaktierten Anteils des AWV hingegen verringert sich.

Im Zuge der Iteration wird die Rechnung mit immer weiter reduzierten virtuellen Schichtdicken $t_{it}^{(n)}$ so lange durchlaufen, bis der ermittelte Kompaktierungsradius $r_{komp}^{(n)}$ gleich dem Außenradius $r_{a\pm60°}^{(n)}$ des virtuellen AWV ist, d.h. bis sich die Schichtdicke $t_3^{(n)}$ des nicht kompaktierten Anteils auf Null reduziert hat. Bei dieser virtuellen Schichtdicke beteiligen sich alle Fasern an der Aufnahme der Belastung durch den Innendruck.
Unberücksichtigt bleibt, dass die Verteilung der Lasten auch in diesem virtuellen AWV ungleichmäßig ist. Die innen liegen Fasern übernehmen den Hauptanteil der Last, während die außen liegenden Fasern gerade unter Spannung gesetzt werden.

Die Annäherung der Werte von $r_{komp}^{(n)}$ an r_{komp} hat in etwa folgenden Verlauf:

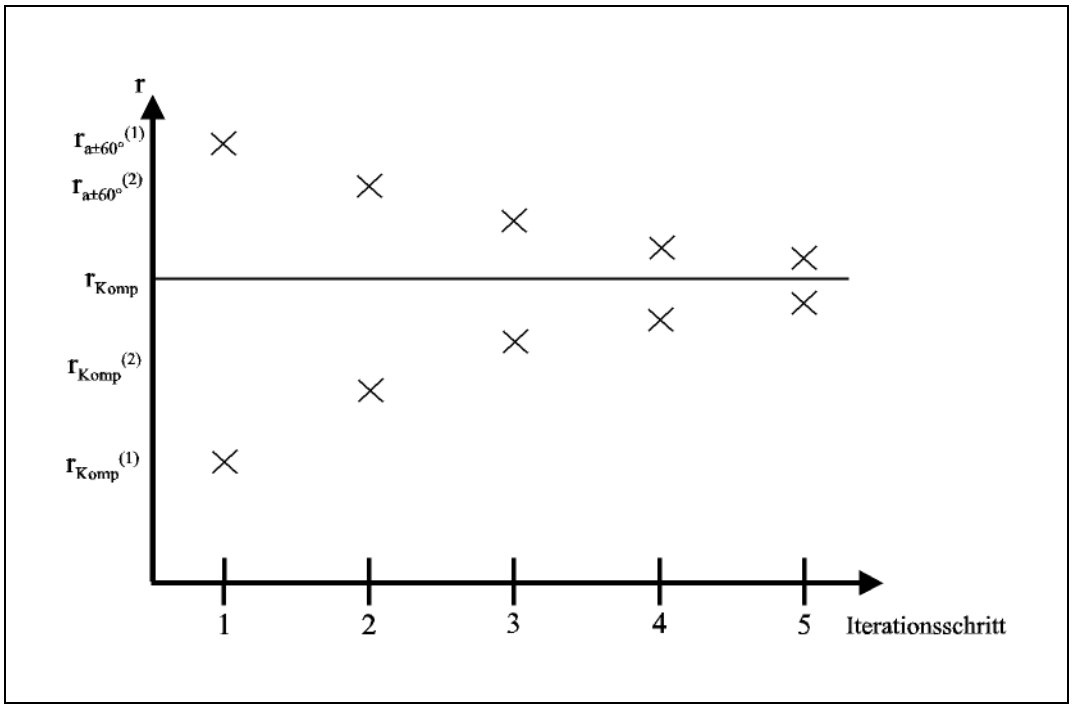


Bild 11.5 Annäherung des Kompaktierungsradius im Iterationsverlauf

Ist der Kompaktierungsradius r_{komp} bestimmt, kann die Dicke t_{nk} des nicht kompaktierten Anteils des realen AWV berechnet werden. Sie entspricht der Differenz zwischen dem Außenradius $r_{a\pm60°}$ der Wicklung und dem Kompaktierungsradius r_{Komp} und ist entscheidend, um die benötigte PA-Menge zur vollständigen Verdrängung der Luft aus der Wicklung (Anteil Δr_{PA} an der Gesamtaufweitung) zu berechnen.

Nach Erläuterung dieser Zusammenhänge wird detailliert auf die einzelnen Anteile der Gesamtaufweitung eingegangen.

a) Aufweitung der Wicklung durch Tränkungsdruck von 10bar (Δr_{mech})

Die Aufweitung Δr_{mech} der Wicklung durch den geforderten Tränkungsdruck von 10 bar setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Es gilt:

$$\Delta r_{mech} = \Delta r_{0°} + \Delta r_{\pm 60°} \tag{11.1}$$

Der erste Anteil $\Delta r_{0°}$ ist die Aufweitung der 0°-Schicht, der zweite Anteil ($\Delta r_{\pm 60°}$) resultiert aus der Aufweitung des AWV mit $\omega = \pm 60°$. Sie werden getrennt berechnet:

- **Aufweitung der 0°-Schicht ($\Delta r_{0°}$):**

Die 0°-Schicht setzt dem radial wirkenden Tränkungsdruck keinen Widerstand entgegen und wird vollständig kompaktiert. Dazu ist bei einem Luftanteil von $\varphi_L = 0{,}5$ und einer Schichtdicke von $t_{0°} = 0{,}6mm$ eine Aufweitung von

$$\begin{aligned} \Delta r_{0°} &= \varphi_L \cdot t_{0°} \\ &= 0{,}5 \cdot 0{,}6mm = 0{,}3mm \end{aligned} \tag{11.2}$$

- **Aufweitung des AWV ($\Delta r_{\pm 60°}$)**

Die Berechnung der Aufweitung $\Delta r_{\pm 60°}$ des AWV durch den Tränkungsdruck erfolgt nach Netztheorie und läuft in mehreren Iterationsschritten ab. Im folgenden wird der Gang der Rechnung für den ersten Iterationsschritt beschrieben. Auf die Änderungen in den weiteren Schritten wird jeweils hingewiesen.
Bild 11.6 zeigt die Orientierung der Faserschichten auf dem Kernrohr:

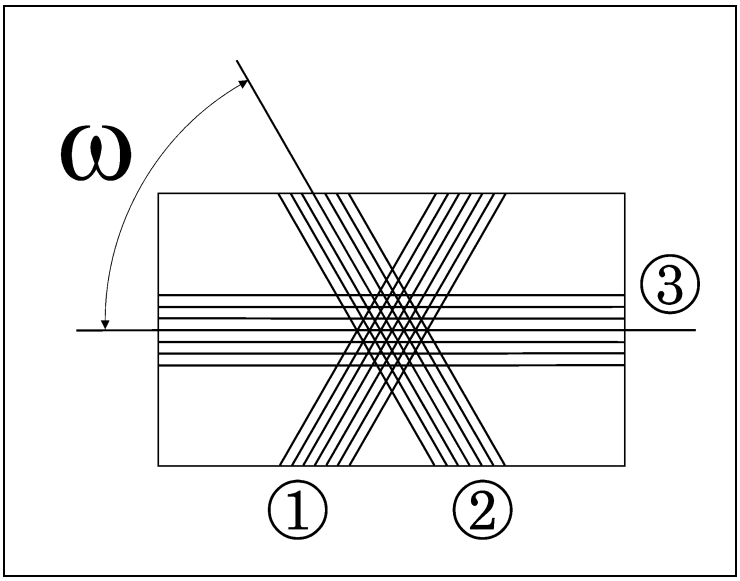


Bild 11.6 Darstellung der drei Faserschichten

Die Schichten 1 und 2 gehören zum AWV mit $\omega = \pm 60°$, die 0°-Schicht trägt die Nummer 3.

Nach Netztheorie [13] gelten für den Zusammenhang zwischen den Hauptnormalflüssen und den Schichtnormalflüssen bei einem AWV mit dritter Faserschicht folgende Beziehungen:

$$n_{\parallel 1} = n_{\parallel 2} = \frac{1}{2 \cdot \sin^2 \omega} \cdot \hat{n}_2 \tag{11.3}$$

$$n_{\parallel 3} = \hat{n}_1 - \hat{n}_2 \cdot \cot^2 \omega \tag{11.4}$$

Die Orientierung der Hauptnormalflüsse am Rohr zeigt Bild 11.7.

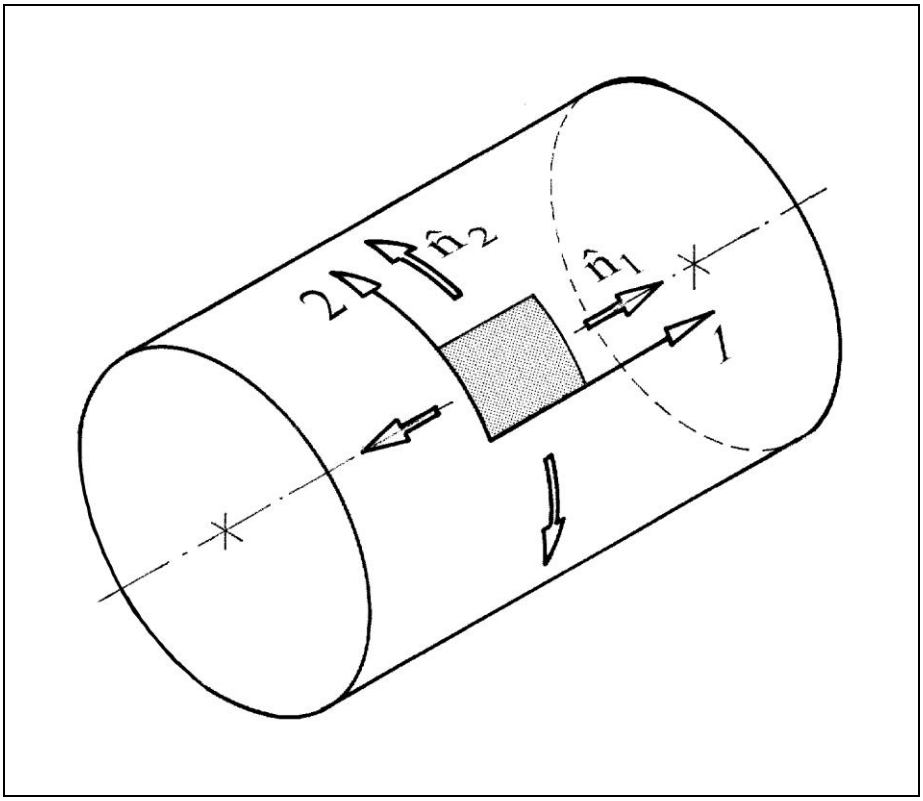


Bild 11.7 Orientierung der Hauptnormalflüsse

Auf die Wicklung im Aufweitbereich wirken die Abzugskräfte in axialer Richtung und der Tränkungsdruck in radialer Richtung. Die Hauptnormalflüsse lassen sich daraus wie folgt berechnen:

- **Hauptnormalfluß** $\hat{n}_1$

Der Hauptnormalfluß $\hat{n}_1$ resultiert aus der axial angreifenden Abzugskraft von $F_{Zugkraft}$ = 3000N. Die Aufweitkräfte besitzen keine Komponente in Rohrlängsrichtung. Es ergibt sich:

$$\hat{n}_1 = \hat{\sigma}_1 \cdot t_{0°/60°} = \frac{F_{Zugkraft}}{\pi \cdot (r^2_{a\pm 60°} - r^2_{i0°})} \cdot t_{0°/60°} \tag{11.5}$$

$$= \frac{3000N}{\pi \cdot ([49{,}6mm]^2 - [47{,}2mm]^2)} \cdot 2{,}4mm = 9{,}865 \frac{N}{mm}$$

- **Hauptnormalfluß** $\hat{n}_2$

Der Hauptnormalfluß $\hat{n}_2$ ergibt sich über die Kesselformel aus dem Tränkungsdruck von 10 bar (bzw. 1 N/mm^2). Die Abzugskräfte haben keinen Einfluß auf $\hat{n}_2$.
Sicherheitshalber wird mit dem Außenradius der Wicklung $r_{a\pm60°}$ gerechnet. Bei den weiteren Iterationsschritten müssen an dieser Stelle die virtuellen Außenradien $r_{a\pm60°}^{(n)}$ eingesetzt werden.

$$\hat{n}_2 = \hat{\sigma}_2 \cdot t = \frac{p \cdot r}{t} \cdot t = p \cdot r = p \cdot r_{a\pm60°} = 1\frac{N}{mm^2} \cdot 49{,}6mm = 49{,}6\frac{N}{mm} \tag{11.6}$$

Mit den berechneten Hauptnormalflüssen können die Schichtnormalflüsse $n_{\parallel1}$, $n_{\parallel2}$ und $n_{\parallel3}$ nach Gl. (11.3) und (11.4) berechnet werden. Auch dabei wird sicherheitshalber mit dem Außenradius $r_{a\pm60°}$ der Wicklung gerechnet (bzw. $r_{a\pm60°}^{(n)}$ im Iterationssverlauf). Es gilt:

$$n_{\parallel1} = n_{\parallel2} = \frac{1}{2 \cdot \sin^2 60°} \cdot 49{,}6\,\tfrac{N}{mm} = 33{,}067\frac{N}{mm}$$

$$n_{\parallel3} = 9{,}865\,\tfrac{N}{mm} - 49{,}6\,\tfrac{N}{mm} \cdot \cot^2 60° = -6{,}668\,\tfrac{N}{mm}$$

Aus den Schichtnormalflüssen können mit Hilfe der Schichtdicken ($t_{0°}$ und $t_{\pm60°}$) die Schichtspannungen ermittelt werden. Die Gesamtdicke $t_{\pm60°}$ des AWV verteilt sich gleichmäßig auf die +60°- und die –60°-Schicht. Bei den weiteren Iterationsschritten muss $t_{\pm60°}$ durch die virtuelle Schichtdicke $t_{it}^{(2)}$ ersetzt werden.
Idealisierend wird angenommen, dass nur die Glasfasern (Faservolumenanteil φ_{Gf} = 0,32) an der Lastaufnahme teilnehmen. Die PA-Fasern bleiben aufgrund ihrer geringen Steifigkeit unbelastet. Zusätzlich muss der Luftanteil der Wicklung von φ_L = 0,5 berücksichtigt werden. Damit ergibt sich für alle Schichten der Wicklung ein tragender Faseranteil von $\varphi_L \cdot \varphi_{Gf}$ = 0,16.

Die Definition der Schichtflüsse ($n=\sigma \cdot t$) liefert:

$$\sigma_{\parallel1} = \sigma_{\parallel2} = \frac{n_{\parallel1}}{\frac{1}{2}t_{\pm60°} \cdot \varphi_L \cdot \varphi_{Gf}} = \frac{33{,}067}{\frac{1}{2} \cdot 1{,}8 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}32}\frac{N}{mm^2} = 229{,}632\frac{N}{mm^2} \tag{11.7}$$

$$\sigma_{\parallel3} = \frac{n_{\parallel3}}{t_{0°} \cdot \varphi_L \cdot \varphi_{Gf}} = \frac{-6{,}668}{0{,}6 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}32}\frac{N}{mm^2} = -71{,}417\frac{N}{mm^2} \tag{11.8}$$

Aus den Spannungen werden mit Hilfe des Elastizitätsgesetzes die Dehnungen der einzelnen Faserschichten bestimmt. Aus den Dehnungen kann auf die radiale Aufweitung der Wicklung geschlossen werden. Relevant sind dabei nur die beiden Schichten des AWV. Die Dehnung der 0°-Schicht hat keinen Einfluß auf die radiale Aufweitung.
Der E-Modul der Glasfasern wird für eine Temperatur von 200°C eingesetzt. Dies entspricht der mittleren Temperatur der Wicklung im Aufweitbereich.
Es gilt:

$$\varepsilon_{\parallel 1} = \varepsilon_{\parallel 2} = \frac{\sigma_{\parallel 1,2}}{E_{Gf}(t = 200°C)} = \frac{229{,}632}{65000} = 0{,}35\% \tag{11.9}$$

Die ermittelten Dehnungen beziehen sich auf die Faserlängsrichtung. Sie müssen mit Hilfe von Geometriebeziehungen (Bild 11.8) auf die Dehnung in Umfangsrichtung umgerechnet werden. Gemäß den Annahmen wird nur die Innenseite der Wicklung betrachtet.

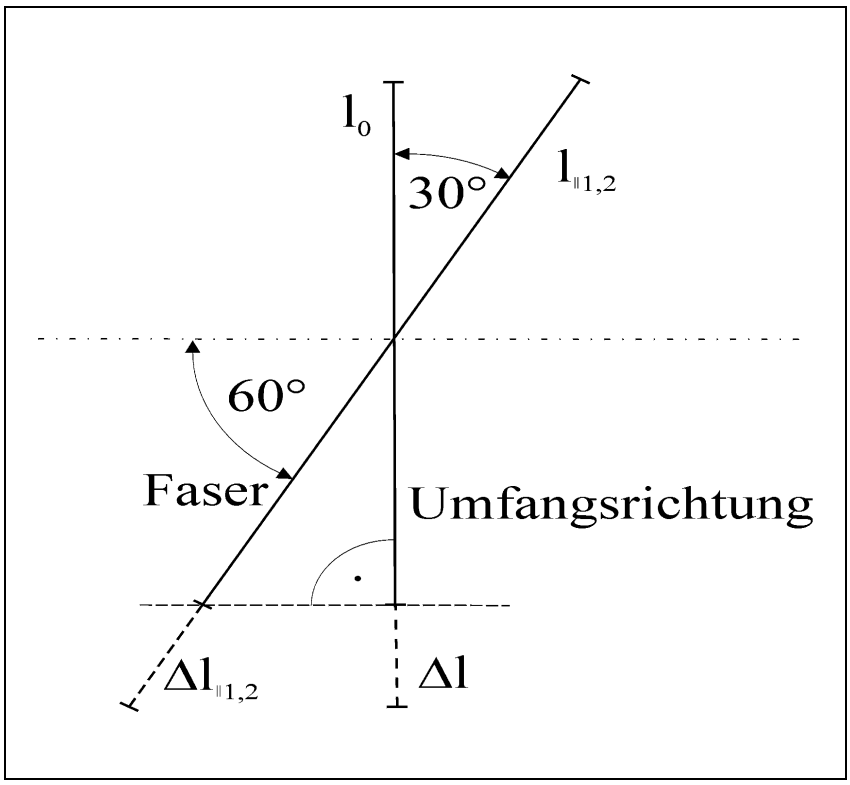


Bild 11.8 Darstellung der Faserlänge $l_{\parallel 1,2}$ und der Umfangslänge l

In Bild 11.8 ist l_0 die abgewickelte Umfangslänge an der Innenseite der Wicklung. Es gilt $l_0 = 2 \cdot \pi \cdot r_{i\pm60°}$. Es ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\cos 30° = \frac{l_0}{l_{\parallel 1,2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{i\pm60°}}{l_{\parallel 1,2}} \tag{11.10}$$

$$\cos 30° = \frac{\Delta l}{\Delta l_{\parallel 1,2}} \tag{11.11}$$

Äquivalenzumformungen der Gleichungen (11.10) und (11.11) liefern:

$$l_{\parallel 1,2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{i\pm60°}}{\cos 30°} \tag{11.12}$$

$$\Delta l = \Delta l_{\parallel 1,2} \cdot \cos 30° \tag{11.13}$$

Durch Hinzunahme der Definition der Dehnung in Faserrichtung $\varepsilon_{\parallel 1,2} = \frac{\Delta l_{\parallel 1,2}}{l_{\parallel 1,2}}$ ergibt sich aus den Gleichungen (11.12) und (11.13) eine Beziehung zwischen der Dehnung in Faserlängsrichtung $\varepsilon_{\parallel}$ und der Längenänderung Δl in Umfangsrichtung:

$$\begin{aligned} \Delta l &= \Delta l_{\parallel 1,2} \cdot \cos 30° \\ &= \frac{\Delta l_{\parallel 1,2}}{l_{\parallel 1,2}} \cdot l_{\parallel 1,2} \cdot \cos 30° && (11.14) \\ &= \varepsilon_{\parallel 1,2} \cdot l_{\parallel 1,2} \cdot \cos 30° && (11.15) \\ &= \varepsilon_{\parallel 1,2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{i\pm60°} && (11.16) \\ &= 0{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 47{,}8mm = 1{,}05mm \end{aligned}$$

Im letzten Schritt wird die Änderung $\Delta r_{\pm60°}$ des Innenradius der Wicklung aus der Längenänderung Δl bestimmt. Sie ergibt sich aus der Differenz zwischen dem aufgeweiteten Radius und dem ursprünglichen Radius $r_{i\pm60°}$. Die Umfangslänge nach der Aufweitung beträgt dabei $l_0+\Delta l$. Für $\Delta r_{\pm60°}$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta r_{\pm60°} &= \frac{l_0 + \Delta l}{2 \cdot \pi} - r_{i\pm60°} && (11.17) \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{i\pm60°} + \Delta l}{2 \cdot \pi} - r_{i\pm60°} && (11.18) \\ &= 0{,}169mm \end{aligned}$$

Entsprechend den Erläuterungen zu Bild 11.4 lassen sich die Dicke t_1 des kompaktierten Anteils des AWV und der Kompaktierungsradius r_{komp} aus der Änderung $\Delta r_{\pm 60°}$ des Innenradius wie folgt bestimmen:

$$t_1 = \frac{\Delta r_{\pm 60°}}{\varphi_L} = 2 \cdot \Delta r_{\pm 60°} = 0{,}338mm \tag{11.19}$$

$$\begin{aligned} r_{Komp} &= r_{i\pm 60°} + t_1 \\ &= 48{,}137mm \end{aligned} \tag{11.20}$$

Der Kompaktierungsradius r_{Komp} im ersten Iterationsschritt ergibt sich damit zu 48,137mm. Die Dicke des nicht kompaktierten Anteils der Wicklung t_3 beträgt:

$$\begin{aligned} t_3 &= r_{a\pm 60°} - r_{Komp} \\ &= 1{,}462mm \end{aligned} \tag{11.21}$$

Im zweiten Iterationsschritt wird die Rechnung mit reduzierter virtueller Schichtdicke $t_{it}^{(2)}$ und damit reduziertem Außenradius $r_{a\pm 60°}^{(2)}$ erneut durchlaufen. Der Kompaktierungsradius r_{komp} steigt an, die Dicke der nicht kompaktierten Schicht t_3 nimmt ab.
Die Rechnung ist beendet, wenn der Kompaktierungsradius $r_{komp}^{(n)}$ gleich dem Außenradius $r_{a\pm 60°}^{(n)}$ des virtuellen AWV ist. Dies ist bei einer virtuellen Schichtdicke von $t_{it}^{(n)}$ =0,772mm der Fall. Der Kompaktierungsradius liegt bei r_{Komp}=48,571mm. Die zugehörige Änderung $\Delta r_{\pm 60°}^{(n)}$ des Innenradius beträgt $\Delta r_{\pm 60°}^{(n)}$ = 0,386mm.

Im Vergleich zu diesem virtuellen AWV ist die Schichtdicke $t_{\pm 60°}$ des realen AWV größer. Allerdings erfahren beide am Innenradius dieselbe Aufweitung von $\Delta r_{\pm 60°}^{(n)}$ = 0,386mm. Im realen AWV nehmen die Fasern nur bis zum iterativ bestimmten Kompaktierungsradius r_{komp} an der Lastaufnahme teil. An der Außenseite liegt eine Schicht, die nicht kompaktiert ist und in der die Fasern unbelastet bleiben. Die Dicke t_{nk} dieser Schicht bestimmt sich aus der Differenz zwischen der realen Schichtdicke $t_{\pm 60°}$ und der virtuellen Schichtdicke $t_{it}^{(n)}$ =0,772mm zu:

$$\begin{aligned} t_{nk} &= t_{\pm 60°} - t_{it}^{(n)} \\ &= 1{,}8mm - 0{,}772mm = 1{,}028mm \end{aligned} \tag{11.22}$$

Mit diesen Ergebnissen kann die mechanische Aufweitung Δr_{mech} der Wicklung durch den Tränkungsdruck von 10 bar bestimmt werden. Sie beträgt:

$$\begin{aligned} \Delta r_{mech} &= \Delta r_{0°} + \Delta r_{\pm 60°}^{(n)} \\ &= 0{,}3mm + 0{,}386mm = 0{,}686mm \end{aligned} \tag{11.23}$$

Einen Gesamtüberblick über die Berechnung von Δr_{mech} gibt folgendes Flussdiagramm:

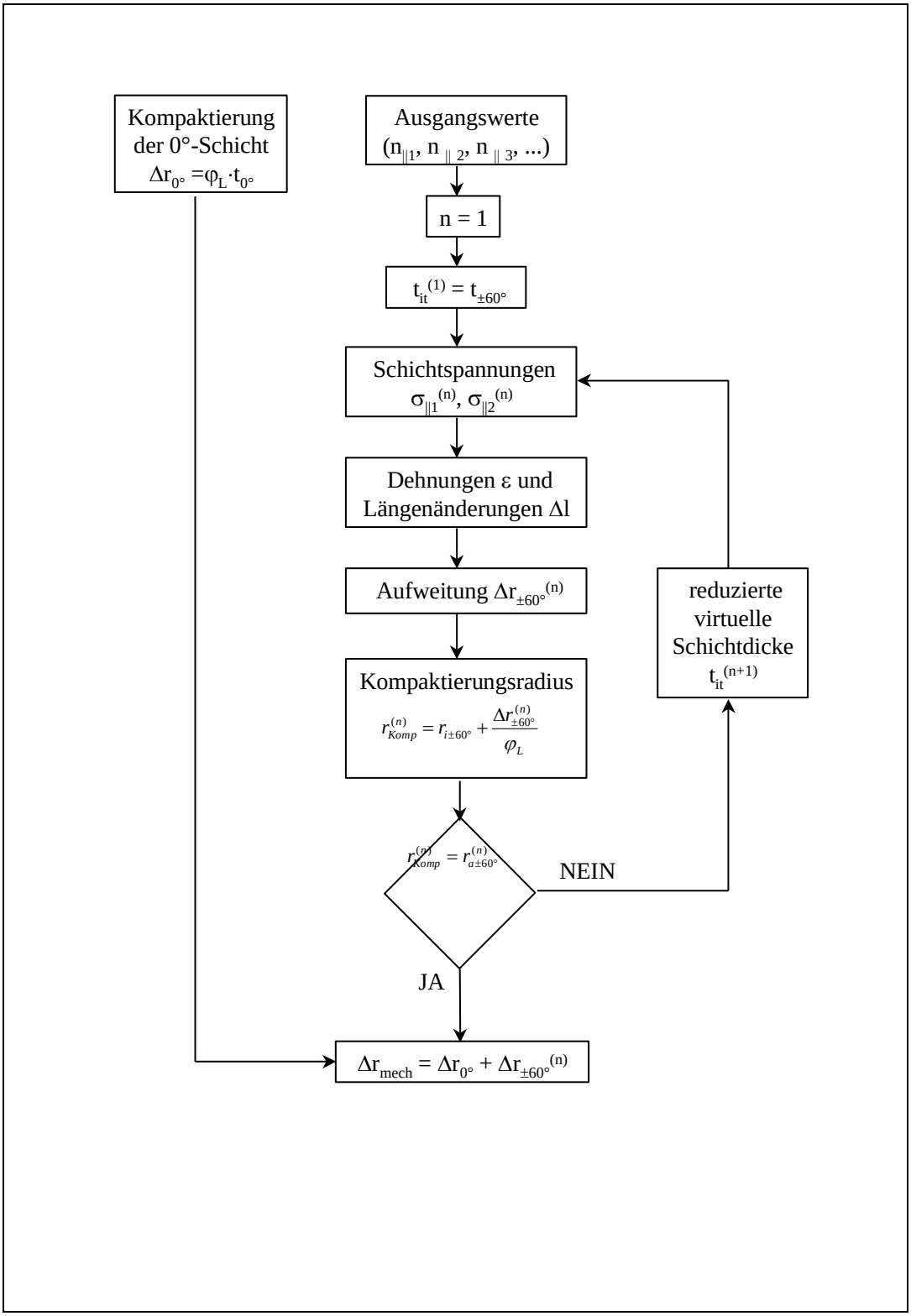


Bild 11.9 Flussdiagramm der Iteration

b) Berechnung der Aufweitung zur vollständigen Verdrängung der Luft aus der Wicklung (Δr_{PA})

Ausgangspunkt für die Berechnung der Aufweitung zur vollständigen Verdrängung der Luft aus der Wicklung ist der in Teil a) berechnete Kompaktierungsradius r_{komp} nach der mechanischen Aufweitung. Einen Überblick über die Verhältnisse gibt Bild 11.10.

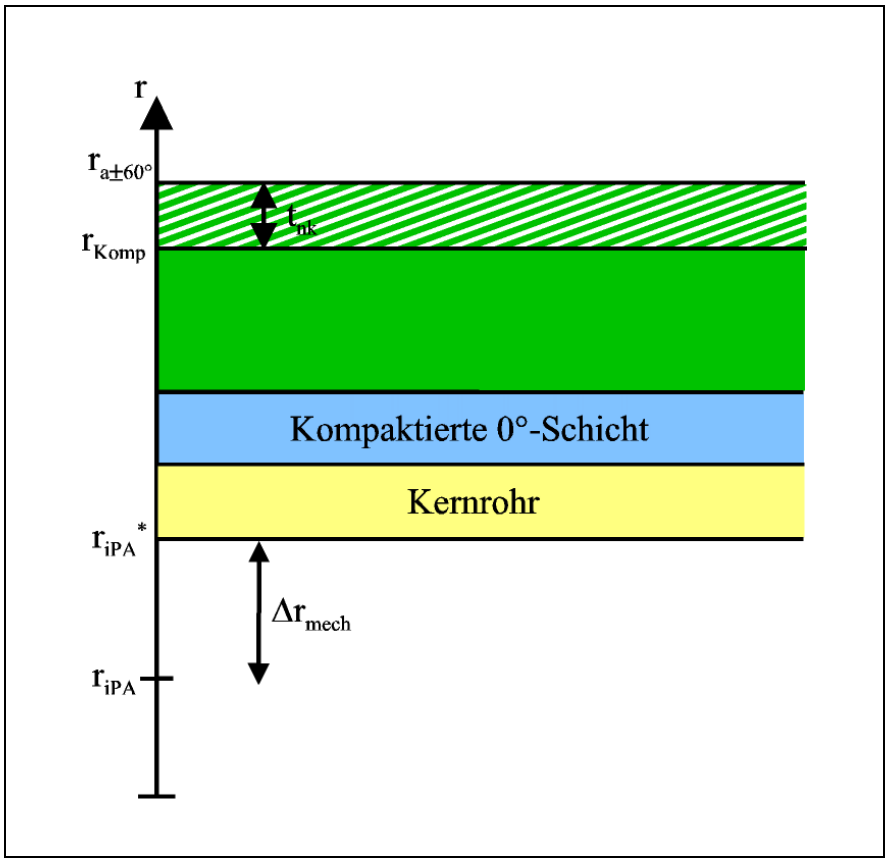


Bild 11.10 Darstellung der einzelnen Schichtdicken

Der Innenradius r_{iPA} des Kernrohres vergrößert sich durch die mechanische Aufweitung um Δr_{mech} auf r_{iPA}^* . Zu erkennen sind die kompaktierte 0°-Schicht, der Kompaktierungsradius r_{komp} und der nicht kompaktierte Anteil der Wicklung mit der Dicke t_{nk}. Dieser liegt zwischen dem Kompaktierungsradius r_{komp} und dem Außenradius $r_{a\pm60°}$ der Wicklung.

Die Berechnung der Aufweitung Δr_{PA} basiert auf der Annahme, dass die durch den Kolben am Innenradius des Kernrohres verdrängte Menge an PA der Luftmenge im nicht kompaktierten Teil der Wicklung entsprechen muss. Aus dieser Annahme läßt sich bei Betrachtung im Querschnitt eine Flächenäquivalenz ableiten.
Für die Luftmenge A_L im nicht kompaktierten Teil der Wicklung gilt im Querschnitt:

$$A_L = \varphi_L \cdot \pi \cdot (r_{a\pm60°}{}^2 - r_{Komp}^2) \tag{11.24}$$

Für die Menge A_{PA} an Polyamid, die am Innenradius des Kernrohres verdrängt wird, ergibt sich:

$$A_{PA} = \pi \cdot (r^{*2} - r_{iPA}{}^2) \qquad \text{mit} \qquad r^* = r_{iPA} + \Delta r_{PA} \tag{11.25/26}$$

Aus der geforderten Gleichheit der Flächen ($A_L = A_{PA}$) gewinnt man eine Beziehung zur Bestimmung von Δr_{PA}. Es gilt:

$$\Delta r_{PA} = \sqrt{\varphi_L \cdot (r_{a\pm 60°}^2 - r_{Komp}^2) + r_{iPA}^2} - r_{iPA} = 0{,}597 mm \tag{11.27}$$

Mit den unter a) ermittelten Werten und dem Innenradius r_{iPA} des Kernrohres ergibt sich für die Aufweitung Δr_{PA} zur Verdrängung der Luft aus der Wicklung ein Wert von $\Delta r_{PA} = 0{,}597$mm.

c) Aufweitung zur Kompensation der thermischen Dehnung der Glasfasern (Δr_T)

Die Berechnung der Aufweitung zur Kompensation der thermischen Dehnung der Glasfasern verläuft in weiten Teilen analog zur Berechnung der mechanischen Aufweitung in Teil a). Theoretisch hätten beide Anteile auch in einem gemeinsamen Rechenschritt bestimmt werden können. Die getrennte Berechnung ermöglicht jedoch den Vergleich untereinander.
Als Grundlage der Berechnung müssen Annahmen über den radialen Temperaturverlauf in Kernrohr und Wicklung getroffen werden. Eine analytische Berechnung des Temperaturverlaufes kann aufgrund der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von PA nicht durchgeführt werden.
Für die Innentemperatur des Kernrohres wird ein maximaler Wert von 100°C angenommen. Bei einer höheren Temperatur besteht die Gefahr des Durchschmelzens. An der Außenseite des Kernrohres muss die Schmelztemperatur von PA12 erreicht werden. Diese liegt bei ca. 180 °C. Die Außentemperatur der Wicklung wird auf 250°C geschätzt.
Aufgrund der Dünnwandigkeit des Rohres (t « r) kann von einem linearen Verlauf der Temperatur über dem Radius ausgegangen werden.

Unter diesen Annahmen ergibt sich in der Wicklung eine mittlere Temperatur von 215°C. Die relevante Temperaturdifferenz ΔT beträgt bei einer Raumtemperatur von 25°C 190K.

Für diese Temperaturdifferenz werden die Dehnungen in Faserrichtung bestimmt und analog zum Vorgehen in Rechnungsteil a) auf die Umfangsrichtung umgerechnet. Zur Verdeutlichung sind in Bild 11.11 die geometrischen Verhältnisse dargestellt. Aus der Längenänderung in Umfangsrichtung kann die zugehörige Aufweitung Δr_T ermittelt werden. Das Superskript T dient der Unterscheidung von den mechanischen Größen.

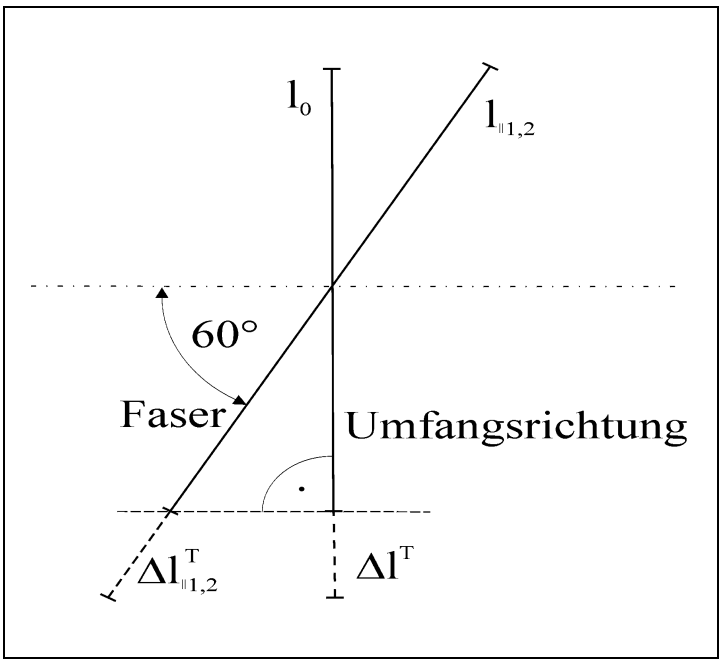


Bild 11.11 Geometrische Verhältnisse bei der Wärmedehnung

Der Gang der Rechnung wird im folgenden beschrieben. Für die thermische Dehnung in Faserrichtung gilt:

$$\varepsilon_{\parallel 1,2}^{T} = \alpha_T \cdot \Delta T = 5 \cdot 10^{-6} \, \tfrac{1}{K} \cdot 190K = 9{,}5 \cdot 10^{-4} \tag{11.28}$$

Als Bezugslänge wird die Ausgangslänge vor der mechanischen Aufweitung verwendet. Der entstehende Fehler kann aufgrund des kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten vernachlässigt werden. Analog zu den Gleichungen (11.10) bis (11.16) ergibt sich für die Längenänderung Δl^T in Umfangsrichtung:

$$\Delta l^T = \varepsilon_{\parallel 1,2}^{T} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{i\pm 60^\circ} = 0{,}285 mm \tag{11.29}$$

Daraus berechnet sich die gesuchte Aufweitung Δr_T zu:

$$\Delta r_T = \frac{l_0 + \Delta l^T}{2 \cdot \pi} - r_{i\pm 60} \tag{11.30}$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{i\pm 60^\circ} + \Delta l^T}{2 \cdot \pi} - r_{i\pm 60^\circ} = 0{,}045 \; mm \tag{11.31}$$

d) Berechnung der Wanddickenänderung des PA-Kernrohres ($\Delta r_{Kernrohr}$)

Im PA-Kernrohr liegt bei der Aufweitung ein rotationssymmetrischer Verzerrungszustand vor. Aufgrund der Dünnwandigkeit des Rohres gilt:

Radialrichtung: $$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\sigma_r - \nu(\sigma_\varphi + \sigma_z)}{E} + \alpha_T \cdot \Delta T \qquad (11.32)$$

Umfangsrichtung: $$\varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} = \frac{\sigma_\varphi - \nu(\sigma_r + \sigma_z)}{E} + \alpha_T \cdot \Delta T \qquad (11.33)$$

Axialrichtung: $$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\varphi)}{E} + \alpha_T \cdot \Delta T \qquad (11.34)$$

bzw. nach [3]:

$$\varepsilon_r \cong \frac{\Delta t}{t} \qquad (11.35)$$

$$\varepsilon_\varphi \cong \frac{\Delta r}{r} \qquad (11.36)$$

$$\varepsilon_z \cong \frac{\Delta z}{z} \qquad (11.37)$$

Ziel ist es, die Radialdehnung ε_r zu bestimmen. Dabei gelten für σ_r, σ_z, ΔT, E_{PA} und ε_φ die folgenden Annahmen:

- Die Radialspannung σ_r ergibt sich aus dem erforderlichen Tränkungsdruck von 10 bar, zu $\sigma_r = -1 \frac{N}{mm^2}$. (im Kernrohr ruft der Tränkungsdruck eine Druckspannung hervor)
- Die Abzugskräfte werden durch Reibung von der Wicklung auf das Thermoplastrohr übertragen. Demzufolge wird das Thermoplastrohr durch die Abzugskraft (3000N) belastet. Für die Spannung σ_z ergibt sich:

$$\sigma_z = \frac{F}{A} = \frac{F_{Zugkraft}}{\pi \cdot (r_{aPA}^2 - r_{iPA}^2)} = \frac{3000N}{\pi \cdot (47{,}2^2 - 41{,}97^2) mm^2} = 2{,}05 \frac{N}{mm^2} \qquad (11.38)$$

- Für die Temperaturdifferenz ΔT wird ein Wert von ca. 120K angenommen. Er resultiert aus der am Außendurchmesser vorliegenden Schmelztemperatur von 180°C und einer maximalen Innentemperatur von 100°C. Dabei wird eine Raumtemperatur von 25°C zugrunde gelegt.

- Gemäß den Annahmen beträgt die mittlere Temperatur in der Kernrohrwand 140°C. Bei dieser Temperatur liegt der Elastizitätsmodul von PA6 bei $E_{PA6}(140°C) = 250 Nmm^{-2}$.

- Bei der Bestimmung der Dehnung ε_φ in Umfangsrichtung wird von der anschaulichen Überlegung ausgegangen, dass das Kernrohr an seiner Außenseite ständig Kontakt zur Wicklung hat. Die Dehnung in Umfangsrichtung ist als $\varepsilon_\varphi = \frac{\Delta r}{r}$ definiert. Der Radius r ist der mittlere Radius PA-Kernrohres, die Änderung Δr entspricht der mechanischen Aufweitung Δr_{mech}.
  Damit gilt:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta r_{mech}}{\frac{1}{2} \cdot (r_{aPA} + r_{iPA})} = 1{,}5\% \tag{11.39}$$

Aus diesen Werten kann σ_φ mit Hilfe von (11.32) berechnet werden.

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi &= \varepsilon_\varphi \cdot E_{PA} - E_{PA} \cdot \alpha_T \cdot \Delta T + \nu(\sigma_r + \sigma_z) \\ &= 1{,}33 \frac{N}{mm^2} \end{aligned} \tag{11.40}$$

Die Dehnung in radialer Richtung ε_r ergibt sich aus (11.25) zu.

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r - \nu(\sigma_\varphi + \sigma_z)}{E} + \alpha_T \cdot \Delta T \\ &= 0{,}18\% \end{aligned} \tag{11.41}$$

Damit erhält man für die Dickenänderung $\Delta r_{Kernrohr}$ des Kernrohres:

$$\begin{aligned} \Delta r_{Kernrohr} &= -\Delta t = -\varepsilon_r \cdot t = -\varepsilon_r \cdot (r_{aPA} - r_{iPA}) \\ &= -0{,}009 mm \end{aligned} \tag{11.42}$$

Es fällt auf, daß die Dehnung in radialer Richtung ε_r positiv und damit der berechnete Wert $\Delta r_{Kernrohr}$ negativ ist. Das bedeutet, daß für den geforderten Tränkunggsdruck 10 bar die Wanddickenänderungen aufgrund der mechanichen Belastung geringer ist als die thermische Dehnung der Kernrohrwand.

d) Gesamtaufweitung

Zum Abschluß der Rechnung müssen die vier berechneten Anteile zur Gesamtaufweitung Δr_{ges} aufaddiert werden. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta r_{ges} &= \Delta r_{mech} + \Delta r_{PA} + \Delta r_{T} + \Delta r_{Kernrohr} \\ &= (0{,}686 + 0{,}597 + 0{,}045 - 0{,}009)mm \\ &= 1{,}319mm \end{aligned} \tag{11.43}$$

Um diesen Betrag muss der Radius des Aufweitdorns im Aufweitbereich zunehmen.

e) Größenvergleich

Ein Vergleich der Größen der verschiedenen Anteile an der Gesamtaufweitung zeigt, daß Δr_T und $\Delta r_{Kernrohr}$ im Vergleich zu Δr_{mech} und Δr_{PA} vernachlässigbar sind. Δr_{mech} und Δr_{PA} machen zusammen mehr als 97% der Gesamtaufweitung aus.
Die Rechnung muss aufgrund der idealisierenden Annahmen über Schichtdicken und Lastverteilung als Überschlagsrechnung gewertet werden. Für eine vereinfachte Rechnung kann auf die Bestimmung der Anteile Δr_T und $\Delta r_{Kernrohr}$ verzichtet werden.

11.2.2 Schrumpfrechnung

Die Schrumpfrechnung wurde bereits im Rahmen einer Studienarbeit behandelt [16]. Die dortigen Ergebnisse konnten übernommen werden, so dass hier nur die wichtigsten Annahmen erläutert werden.
Als Berechnungsgrundlage dient die um die thermische Eigenspannungen erweiterte CLT. Mit ihrer Hilfe kann der Schrumpf in Umfangsrichtung berechnet werden. Dieses Verfahren wurde bereits in Form einer Excel-Tabelle implementiert [16] und von uns in die Dateien [Gesamtberechnung.xls] übernommen.
Die Schrumpfrechnung orientiert sich genauso wie die Aufweitrechnung direkt an dem Verfahrensablauf. Nach der Aufweitung und dem Einschmelzen des PA in die Hybridfaserwicklung liegt ein stark erhitztes FKV-Rohr mit drei Faserschichten vor. Zu beachten ist jedoch, dass dieser Verbund erst unterhalb der Erstarrungstemperatur von PA existiert. Dies ist erst bei ca. 200°C der Fall. Zunächst muß also die temperaturbedingte Kontraktion der Glasfasern zwischen der Austrittstemperatur aus der Heizung und der Erstarrung zum Verbund berechnet werden.
Erst danach ermittelt man die thermischen Eigenspannungen im Bereich von der Erstarrungstemperatur bis zur Raumtemperatur. Hierfür wird bei der CLT das FKV-Rohr gedanklich abgewickelt, so dass ein ebener vierschichtiger Verbund entsteht. Diese vier Schichten gliedern sich in die drei Faserschichten und einer vierten Schicht, die nur aus einer reinen PA-Matrix besteht. Die Matrix ist dabei der nicht aufgeschmolzene Teil des PA-Rohres.
Die letzte wichtige Annahme für die Durchführung der Schrumpfrechnung stellt noch die Relaxation der gedehnten Glasfasern dar. Dieses Relaxieren hat seine Ursache im Aufschmelzen des aufgeweiteten PA-Rohres. Infolgedessen müssen in der Rechnung für den Verbund keine mechanischen Dehnungen und Spannungen berücksichtigt werden.
Abschließend ist noch zu erwähnen, dass diese Analyse nicht nur den Schrumpf in radialer Richtung berechnet, sondern durch einige Modifikationen auch dazu benutzt werden kann den Betriebszustand des FKV-Rohres zu errechnen.

11.2.3 Berechnung der Abzugskräfte

Die Abzugskraft ist die notwendige axiale Zugkraft, um das Versuchsrohr mit einem konstanten Vorschub über den Aufweitdorn zu ziehen. Ist die axiale Zugkraft kleiner als die Abzugskraft tritt Haftreibung zwischen dem Rohr und dem Kolben im Aufweitbereich ein. Die Berechnung ist notwendig, um den Hydraulikzylinder gegebenenfalls gegen Knicken zu schützen und um das Zugseil zu dimensionieren. Die Abzugskraft lässt sich mit Hilfe des Coloumbschen Reibgesetzes aus der Radialkraft im Aufweitbereich berechnen. Hierzu müssen zuerst der Verlauf des Durchmessers und der des Druckes formelmäßig erfasst werden. Die Formel des Kolbendurchmessers errechnet sich aus einfachen Geometriebeziehungen.

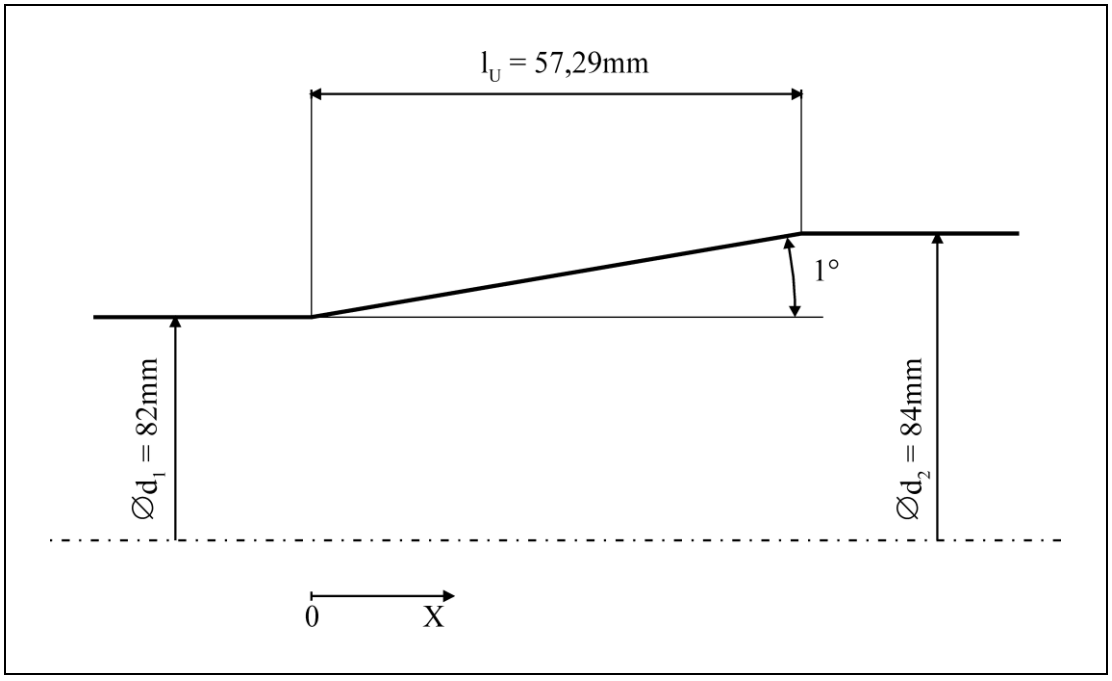


Bild 11.12 Verlauf des Kolbendurchmessers im Bereich der Aufweitung

Nach Bild (11.12) ergibt sich:

$$d(x) = d_1 + 2 \cdot (x \cdot \tan\alpha) = d_1 + \frac{d_2 - d_1}{l_U} \cdot x \qquad (11.44)$$

Der Druckverlauf kann aufgrund der linearen Aufweitung ebenfalls als linear angenommen werden. Kennzeichnen p_1 und p_2 analog zum Verlauf des Durchmessers den Anfangs- und Enddruck, so folgt für den Druckverlauf:

$$p(x) = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{l_U} \cdot x \qquad (11.45)$$

mit $p_1 = 0{,}1 \frac{N}{mm^2}$

und $p_2 = 1 \frac{N}{mm^2}$

Die vom Kolben aufzubringende Radialkraft berechnet sich aus der Integration des Druckverlaufs über die Fläche des Umformbereichs.

$$F_R = \int p(x) dA_U = \int p(x) \cdot \pi \cdot d(x) dx \tag{11.46}$$

$$\begin{aligned} F_R &= \int_0^{l_U} \pi \cdot (p_1 + \frac{p_2 - p_1}{l_U} \cdot x) \cdot (d_1 + \frac{d_2 - d_1}{l_U} \cdot x) dx \\ &= \pi \cdot \left(p_1 d_1 l_U + \tfrac{1}{2} p_1 [d_2 - d_1] l_U + \tfrac{1}{2} [p_2 - p_1] d_1 l_U + \tfrac{1}{3} [p_2 - p_1][d_2 - d_1] l_U \right) \\ &= \tfrac{1}{3} \pi \cdot l_U \cdot (p_1 d_1 + \tfrac{1}{2} p_1 d_2 + \tfrac{1}{2} p_2 d_1 + p_2 d_2) \end{aligned} \tag{11.47}$$

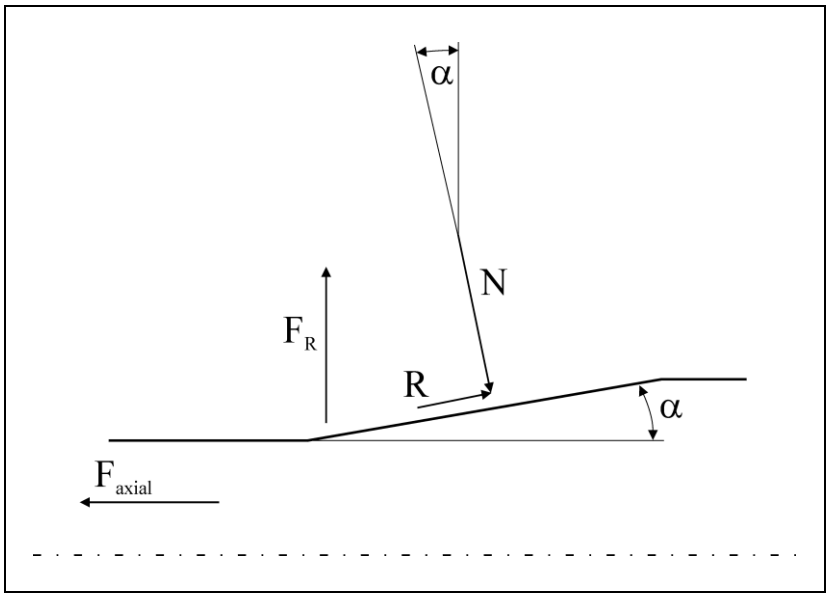


Bild 11.13 Am Aufweitdorn angreifende Kräfte

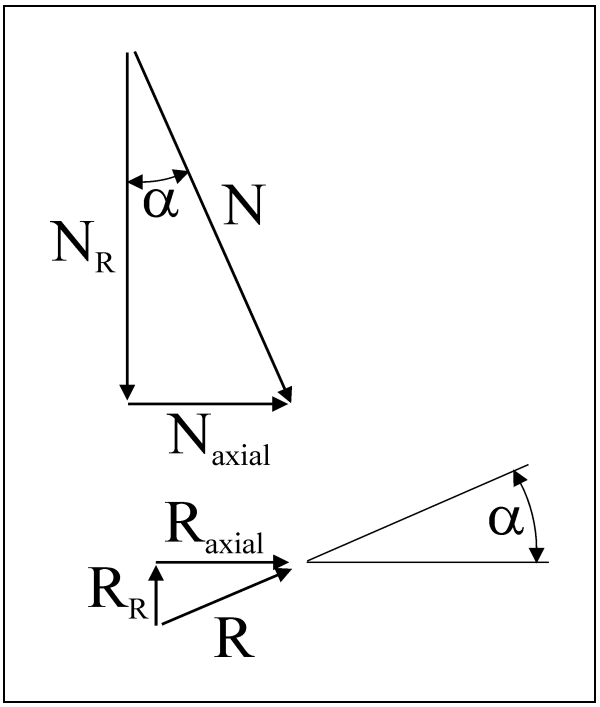


Bild 11.14 Kräftezerlegung der Normal- und der Reibkraft

Betrachtet man die Kräftezerlegung am Aufweitbereich des Kolbens wie im Bild (11.21) dargestellt, so lassen sich mit der Gleichgewichtsbedingung zwei Gleichungen aufstellen.

$$\sum F_{iy} = 0: \qquad F_R = N_R - R_R = N \cdot \cos\alpha - R \cdot \sin\alpha \tag{11.48}$$

$$\sum F_{ix} = 0: \qquad F_{axial} = N_{axial} + R_{axial} = N \cdot \sin\alpha + R \cdot \cos\alpha \tag{11.49}$$

Verwendet man zusätzlich noch das Coulombsche Reibgesetzt R=μ·N erhält man die gesuchte Gleichung für die Axialkraft.

$$F_{axial} = F_R \cdot \frac{\sin\alpha + \mu \cdot \cos\alpha}{\cos\alpha - \mu \cdot \sin\alpha} \tag{11.50}$$

Der Wert für den Gleitreibungskoeffizienten wurde dabei [2] entnommen. Er beträgt bei PA näherungsweise 0,36. Mit diesen Angaben erhält man eine Abzugskraft von 3100N.

11.3 Montageanleitung

11.3.1 Montage und Demontage des Kolbens

Der Kolben baut auf der Trägerplatte auf, die in das CFK-Trägerrohr eingeklebt ist. Zur Vorbereitung der Montage werden die radial dichtenden O-Ringe in die entsprechenden Nuten an Trägerplatte, Endplatte und den Zugankern eingesetzt und die axial wirkenden O-Ringe von beiden Seiten auf die Isolationsplatte aufgeschoben. Dabei ist vor allem bei den O-Ringen auf den Zugankern auf eine gute Schmierung zu achten. Gleiches gilt für die Paßflächen zur Zentrierung der Bauteile.
Die eigentlichen Montage des Kolbens vollzieht sich in mehreren Schritten:
Auf die Düse für den Heizbereich werden die entsprechende Distanzscheibe und der O-Ring aufgeschoben. Danach wird sie in die zentrale Bohrung der Trägerplatte eingeschraubt. Der Verdränger kann auf die Düse aufgeschoben und mit Hilfe der Madenschraube fixiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Nuten im Verdränger mit den Bohrungen für die Zuganker in der Trägerplatte fluchen.

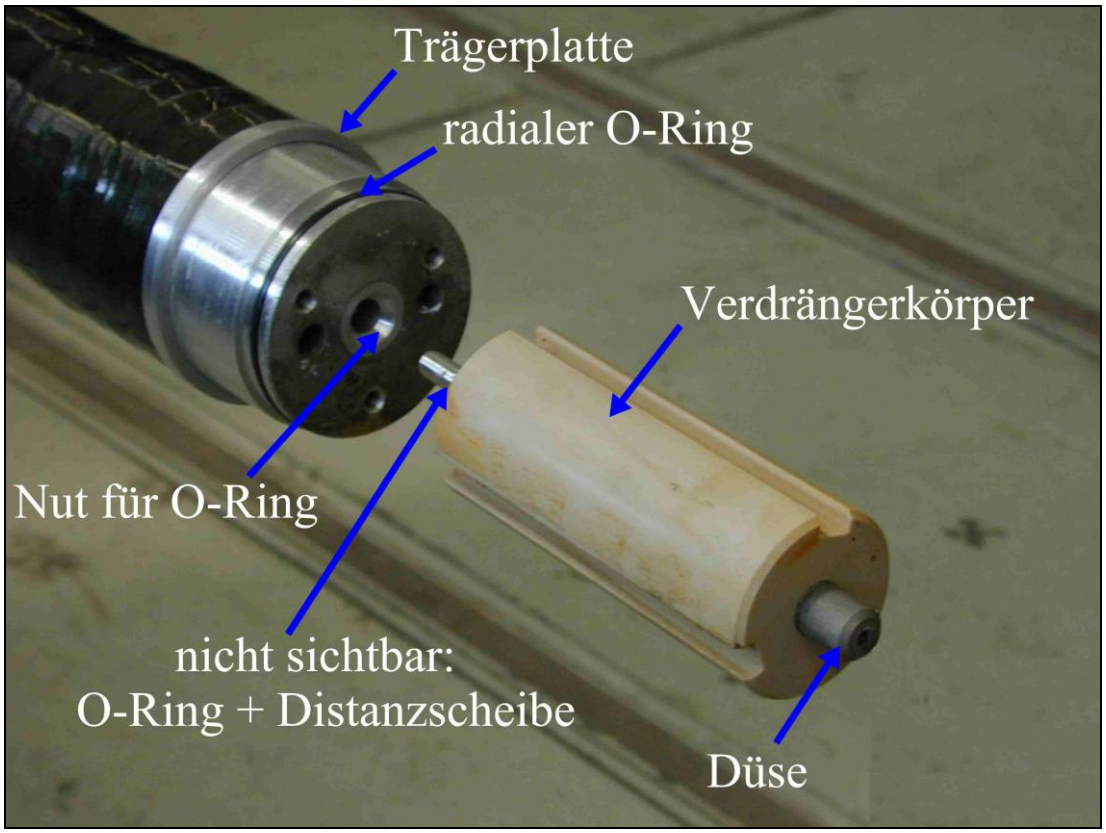


Bild 11.15 Schritt 1: Trägerplatte und Düse

Im nächsten Schritt werden die Zuganker angebracht.

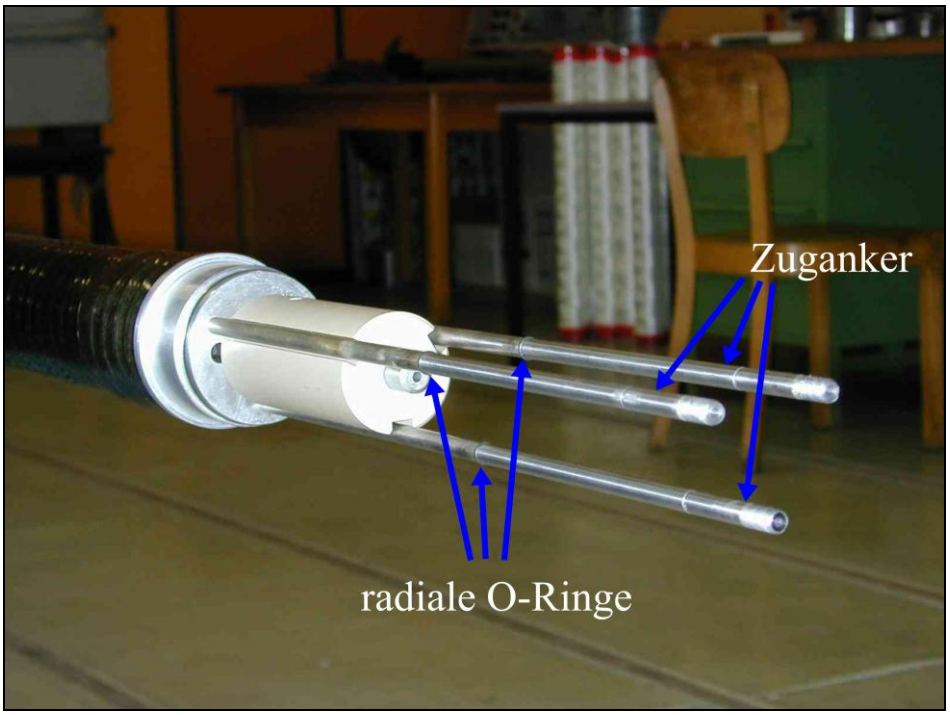


Bild 11.16 Schritt 2: Zuganker montiert

Der Aufweitdorn wird über den Verdränger geschoben und zentriert sich auf der Trägerplatte. Zur Montage der Isolationsplatte müssen die Zuganker in die entsprechenden Löcher der Isolationsplatte eingefädelt werden. Danach kann die Isolationsplatte über die Zuganker geschoben werden und zentriert sich im Aufweitdorn. Dabei ist für das letzte Stück eine besonders gute Schmierung erforderlich, da die Isolationsplatte über die Dichtungen auf den Zugankern geschoben werden muss.

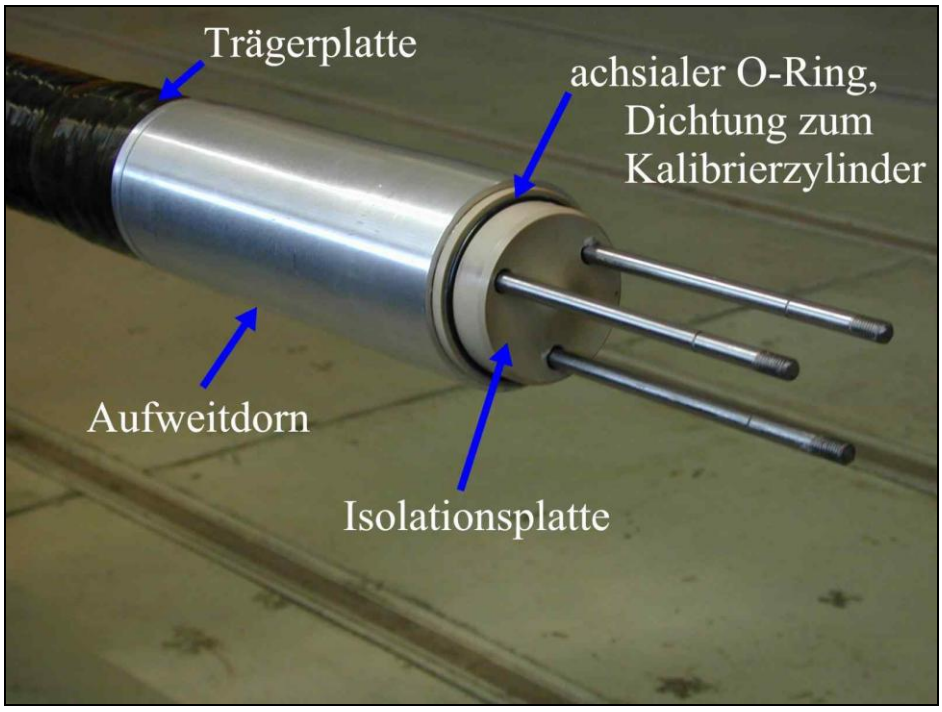


Bild 11.17 Schritt 3: Aufweitdorn und Isolationsplatte (montiert)

Der Kalibrierzylinder kann aufgeschoben werden.

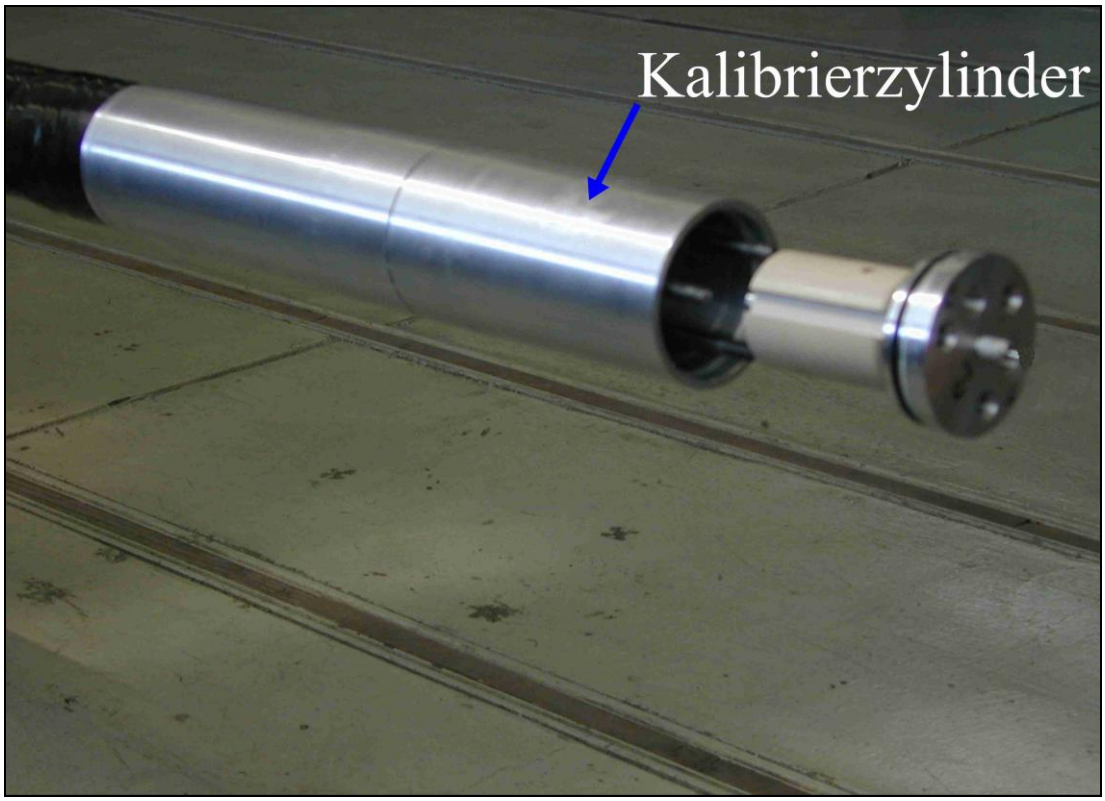


Bild 11.18 Schritt 4: Kalibrierzylinder, Düse und Endplatte montiert

Im nächsten Schritt wird die Endplatte in den Kalibrierzylinder eingesetzt. Vorher muss die Düse für den Kühlbereich zusammen mit der Distanzscheibe in die Endplatte eingeschraubt und der Verdränger auf der Düse befestigt werden. Dabei ist wieder darauf achten, dass die Nuten im Verdränger mit den Durchgangslöchern für die Zuganker in der Endplatte übereinstimmen.
Nach dem Anbringen der Endplatte ist der Kolben verschlossen. Im letzten Schritt werden die entsprechenden O-Ringe an den Durchtrittsstellen der Zuganker angebracht, die Dichtscheiben auf die Zuganker aufgeschoben und der ganze Kolben über die Zuganker verspannt.
In die Endplatte können danach die Anschlußstutzen für die Kühlschläuche eingeschraubt werden.
Es ergibt sich folgendes Gesamtbild:

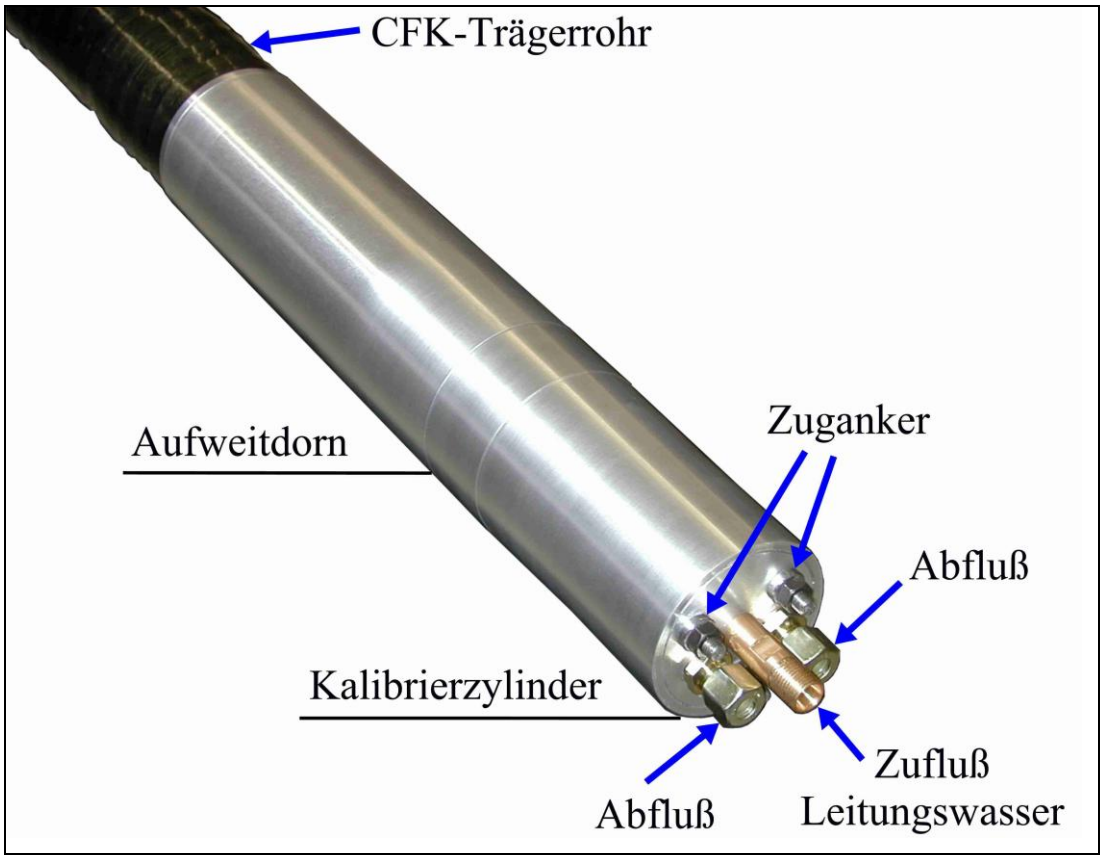


Bild 11.19 Fertig montierter Kolben

Zur Demontage des Kolbens werden die Muttern auf den Zuganker und die Dichtscheiben entfernt. Danach kann der Kalibrierzylinder komplett mit der Endplatte von der Isolationsplatte abgezogen werden. Die Isolationsplatte verbleibt im Aufweitdorn; die Endlatte kann aus dem Kalibrierzylinder heraus gedrückt werden.
Im zweiten Schritt wird der Aufweitdorn von der Trägerplatte abgezogen, wobei auch die Isolationsplatte entfernt wird.
Der letzte Schritt ist das Abschrauben der Zuganker und der Düse von der Trägerplatte.

11.3.2 Montage des Trägerrohres

Bei der Montage des Trägerrohres muss sorgfältig vorgegangen werden, da Verankerung und Trägerplatte in das CFK-Rohr eingeklebt werden, was eine spätere Demontage unmöglich macht.
Die im Innern des Trägerrohres verlaufenden Ermeto-Rohre werden einseitig mit einem Feingewinde versehen und gemeinsam mit dem Zuganker in die entsprechenden Bohrungen auf der Rückseite der Trägerplatte eingeschraubt. Die Gewinde werden mit Loctite-Schraubensicherung gegen Losdrehen gesichert.
Im nächsten Schritt werden das CFK-Rohr und die Verankerung über die Ermeto-Rohre bzw. über den Zuganker geschoben. Dabei ist darauf zu achten, dass die Ermeto-Rohre und der Zuganker durch die richtigen Bohrungen in der Verankerung treten.

Die Klebeflächen an Trägerplatte und Verankerung werden mit Kleber bestrichen und die beiden Teile anschließend mit Hilfe einer hydraulischen Presse in das CFK-Rohr eingepresst.
Nach dem Aushärten des Klebers ist die Montage abgeschlossen.

11.3.3 Montage der Heizung

Die Montage der Heizung ist unkompliziert, da sie größtenteils aus Mechanikelemtenten der Firma Bosch im Baukastenprinzip zusammengesetzt wird. Die Aluminiumprofile werden auf die entsprechende Länge gesägt und über Winkel verbunden. Um eine Unwucht der Trommel zu vermeiden, ist bei der Montage der Flansche darauf zu achten, dass sie zentrisch in der Trommel sitzen.
Im nächsten Schritt werden die Isolationsplatten im Innern der Heizungstrommel angebracht. Dazu muss auf der einen Seite der Trommel der Flansch zusammen mit den radialen Streben vorübergehend demontiert werden. Sind die Isolationsplatten angebracht, können die Strahler montiert werden.
Dazu werden die Halterungen, die die Strahler tragen, an die Klemmstangen angeschraubt und die Klemmstangen über eine Klemmung an den Verbindungsstreben der Heizung befestigt. Die Kabel werden nach außen geführt und laufen radial am Flansch zusammen. Der Teil der Kabel, der im Innern der Heizung verläuft wird mit Glasfasermatten isoliert.
Anschließend wird die Trommel wieder verschlossen und auf das Heizungsgestell aufgelegt.

11.3.4 Montage und Demontage der Wickelvorrichtung

a) Montage
   Bei der Montage der Wickelvorrichtung wird zunächst eine der beiden Zentrierungen auf der Welle festgeklemmt. Das Kernrohr wird aufgeschoben und durch Anbringen der zweiten Zentrierung befestigt. Als letztes werden die beiden Stiftkränze über die Zentrierungen geschoben und durch die Madenschrauben festgeklemmt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Bohrungen in den Stiftkränzen über den entsprechenden Madenschrauben in den Zentrierzylindern liegen.

b) Demontage
   Für die Demontage gibt es zwei Möglichkeiten, je nachdem, ober der hintere Stiftkranz abgetrennt wird oder mit dem Rohr verbunden bleibt. Der vordere Stiftkranz muss auf jeden Fall mit dem Rohr verbunden blieben, da er im Versuch der Einleitung der Zugkräfte dient.

   - Demontage ohne Abtrennung des hinteren Stiftkranzes
     Der hintere Stiftkranz bleibt nach der Bewicklung fest mit dem Versuchsrohr Kolben gezogen.
     Der Vorteil dabei ist, dass die Wicklung nicht aufgetrennt werden muss und dass sich der hintere Stiftkranz an der Einleitung der Zugkräfte in das Kernrohr beteiligt. Die Kraftübertragung auf das Kernrohr wird verbessert, da er formschlüssig zwischen den durch die Wicklung verspannten Stiftkränzen liegt.

Nachteilig ist, dass die ohnehin beschränkte Länge des produzierten Rohres durch den zweiten Stiftkranz nochmals um mehr als 10 cm reduziert wird.
Von dieser Möglichkeit wird daher abgesehen.

- Demontage mit Abtrennung des hinteren Stiftkranzes
  Bei dieser Form der Demontage wird die Wicklung kurz vor dem hinteren Stiftkranz durchtrennt und mit einer Drahtklemmung gesichert. Danach können der hintere Stiftkranz und der hintere Zentrierzylinder entfernt werden und das fertig bewickelte Rohr vom vorderen Zentrierzylinder abgezogen werden.
  Im anschließenden PAZ-Verfahren werden die Zugkräfte über Reibung zwischen Wicklung und Kernrohr in das Kernrohr eingeleitet. Die Länge des hergestellten Verbundrohres ist größer als bei der Variante ohne Abtrennung des hinteren Stiftkranzes.

11.3.5 Montage der Abzugsvorrichtung

Zur Montage der Abzugsvorrichtung wird die Gabel, die die Rolle hält, auf die Kolbenstange des Hydraulikzylinders aufgeschraubt. Achse und Rolle werden eingesetzt und die Achse mit einem Sprengring gesichert. Das Seil wird mit Hilfe des Schäkels an der Halterung des Kolbens verankert.

11.3.6 Gesamtmontage

Im ersten Schritt der Gesamtmontage werden die Nutenplatten, auf denen Kolben und Hydraulikzylinder verankert werden, waagrecht ausgerichtet und im Abstand von ca. 6000mm am Boden verschraubt.
Aufgrund der Größe der Heizung müssen Kolben und Stahlseil mindestens in einer Höhe von ca. 600 mm über dem Boden angebracht werden. Dazu ist die Höhe der Nutenplatten allein nicht ausreichend. Die Halterung für das Trägerrohr und der Hydraulikzylinder müssen angehoben werden. Dies geschieht durch entsprechende Doppel-T-Träger, die jeweils zwischen Nutenplatte und Halterung bzw. zwischen Nutenplatte und Hydraulikzylinder eingebaut werden. Die Feinjustierung erfolgt durch Unterlegbleche mit Hilfe einer Schlauchwasserwaage.
Nach der Montage des Hydraulikzylinders kann die Führung für die Kolbenstange angebracht und ausgerichtet werden. Das Stahlseil wird am Hydraulikzylinder eingehängt.
Im nächsten Schritt werden Trägerrohr und Kolben in der Halterung montiert. Durch Spannen des Zugankers im Innern des Trägerrohres wird der Kolben horizontal ausgerichtet.

Die Heizung und der Wagen zum Abstützen des Rohres im Versuchsverlauf werden zwischen den beiden Nutenplatten aufgestellt. Die Nivellierung der Heizung auf Kolbenhöhe erfolgt durch eine Höhenverstellung der Pfosten, die die Lager für die Heizungstrommel tragen. Die Finnen, die den Heizungswagen führen, werden so ausgerichtet, dass der Kolben zentrisch durch die Heizung tritt.

Im letzten Schritt werden die Kreisläufe für Heiz- und Kühlwasser geschlossen. Dabei verlaufen die Schläuche für das Kühlwasser gemeinsam mit dem Stahlseil durch das Innere der Heizung. Um eine Überhitzung der Schläuche zu verhindern, werden sie zur Isolation mit Glasfasermatten umwickelt.

11.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung gliedert sich in vorbereitende Schritte, den eigentlichen Versuch und die Entnahme des fertigen Verbundrohres.

11.4.1 Vorbereitende Schritte

Zu den vorbereitenden Schritten zählen das Bewickeln des Kernrohres und seine Integration in den Versuchsstand.

Das Vorgehen bei der Bewicklung ist bei der Beschreibung der Wickelvorrichtung erläutert. Nach der Bewicklung wird der hintere Stiftkranz abgetrennt, der vordere bleibt mit dem Rohr verbunden.

Die Integration des Versuchsrohres in den Versuchsstand gliedert sich in mehrere Schritte:
Zunächst wird der Flansch, an dem die Zugvorrichtung angreift mit dem vorderen Stiftkranz verschraubt. Anschließend werden die Heizschläuche vom Trägerrohr demontiert und das Trägerrohr nach Lösen der Befestigungsmutter aus der Halterung entnommen. Das Versuchsrohr wird nun von hinten über die Verankerung auf das Trägerrohr aufgeschoben.
Im nächsten Schritt wird das Trägerrohr wieder in der Halterung befestigt. Die Heizschläuche werden angeschlossen und die Zugvorrichtung bestehend aus den beiden Zugstangen und dem Querträger an den Flansch des Versuchsrohres angekoppelt. Im Bereich des vorderen Stiftkranzes muss das Versuchsrohr mit einer Isolation aus Glasfasermatten vor der Heizstrahlung geschützt werden. Ansonsten findet auch in diesem Bereich durch das Aufschmelzen des PA-Anteils der Hybridwicklung eine teilweise Kompaktierung statt, durch die das Abtrennen des vorderen Stiftkranzes nach Ende des Versuches erschwert.
Im letzten Schritt wird das Stahlseil in den Querträger eingehängt. Im betriebsbereiten Zustand hat der Versuchsstand folgendes Aussehen:

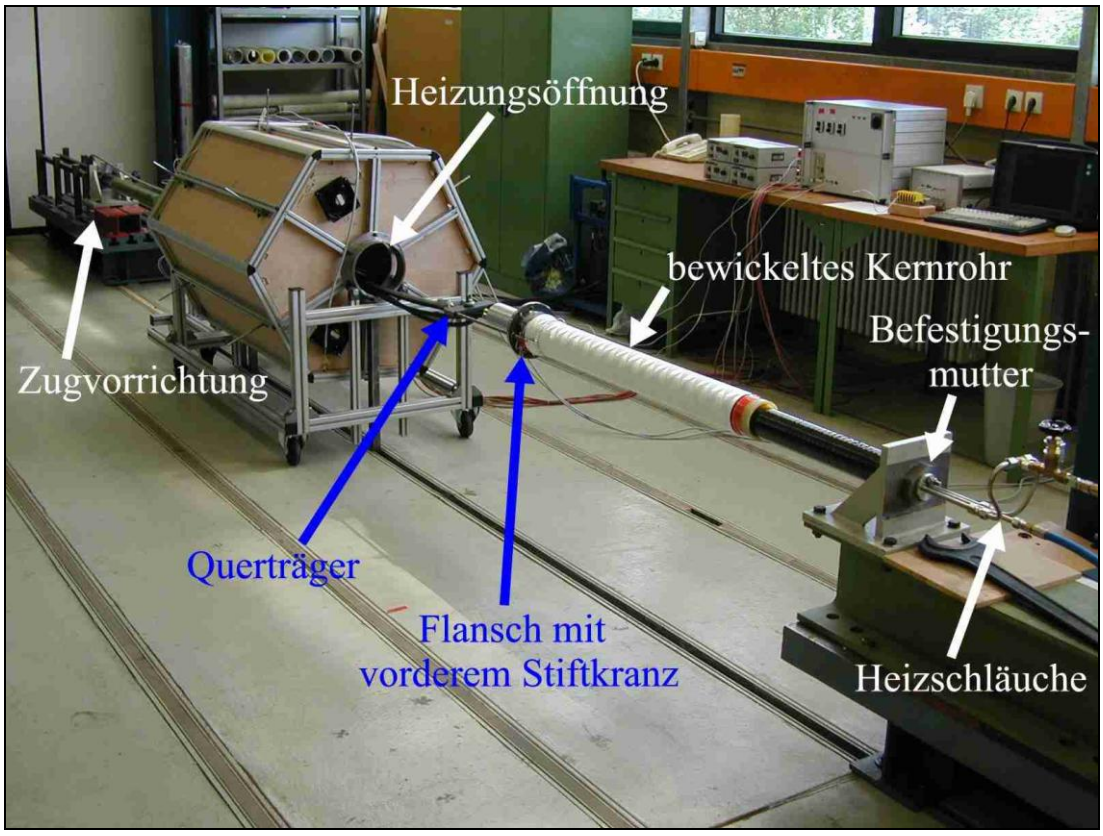


Bild 11.20 Versuchsstand (betriebsbereit)

11.4.2 Versuch

Bei Versuchsbeginn steht die Heizung vor dem Kolben. Die Strahler werden eingeschaltet und die Strömung im Heiz- und Kühlkreislauf in Gang gesetzt. Die gewünschte Außentemperatur des Kolbens im Aufweitbereich wird über die Drosselung des Wasserstromes vom Hochdruckreiniger eingestellt.
Anschließend wird die Heizung langsam in Richtung Kolben und damit über das Versuchsrohr geschoben. Hat die Heizung ihre endgültige Position erreicht, wird der Hydraulikzylinder ausgefahren und damit das Versuchsrohr über den Kolben gezogen. Durch diese Hintereinanderschaltung aus Heizungsbewegung und Bewegung des Versuchsrohres wird sichergestellt, dass das Versuchsrohr über die komplette Länge die gleiche thermische Behandlung erfährt. Ansonsten würden die zuletzt kompaktierten Bereiche des Versuchsrohres aufgrund ihrer längeren Verweildauer im Heizungsbereich erheblich stärker erwärmt.
Sobald das Rohr aus der Heizung austritt, stützt es sich bis zum Versuchsende auf dem Wagen ab. Dieser bewegt sich mit dem Rohr in Richtung des Hydraulikzylinders.
Nachdem das Rohr komplett über den Aufweitdorn gezogen wurde, werden die Strahler abgeschaltet und der Kühl- und Heizkreislauf unterbrochen. Der eigentliche Versuch ist damit beendet.

11.4.3 Entnahme des Verbundrohres

Zur Demontage des Versuchsrohres wird die Zugvorrichtung abgekoppelt und die Kühlschläuche werden vom Kolben gelöst. Danach kann das Versuchsrohr vom Endes des Kalibrierzylinders abgezogen werden.

Im letzten Schritt wird der vordere Stiftkranz vom Verbundrohr abgetrennt und der Flansch vom Stiftkranz gelöst. Der Stiftkranz kann zur Bewicklung des nächsten Rohres eingesetzt werden.

11.5 Versuchsberichte

Ziel der ersten Versuche ist die Überprüfung der Funktionsweise der aufgebauten Anlage und die Ermittlung erster Anfangsparameter für die Strahlerheizung. Hierfür sind mehrere Versuche durchgeführt worden.

11.5.1 Heizversuch 1

Versuchziel und Versuchsaufbau:

Das Versuchsziel war die Funktionstüchtigkeit der Kolbenvorrichtung zu überprüfen. Dazu gehörte unter anderem eine Dichtheitsprüfung und die Kontrolle der thermischen Trennung zwischen Aufweitdorn und Kalibrierzylinder. Weiterhin wurde der Temperaturverlauf direkt am Kolben ermittelt.
Hierfür wurde der Kolben isoliert, ohne Heizung und ohne Kühlung, getestet. Am Kolben wurde oben und unten je ein NiCr-Ni-Thermoelement befestigt und mit dem Meß-PC verbunden. Danach wurde der Aufweitdorn mit Hilfe des Hochdruckreinigers (HDR) beheizt. Der Druck am HDR wurde auf 7bar eingestellt.

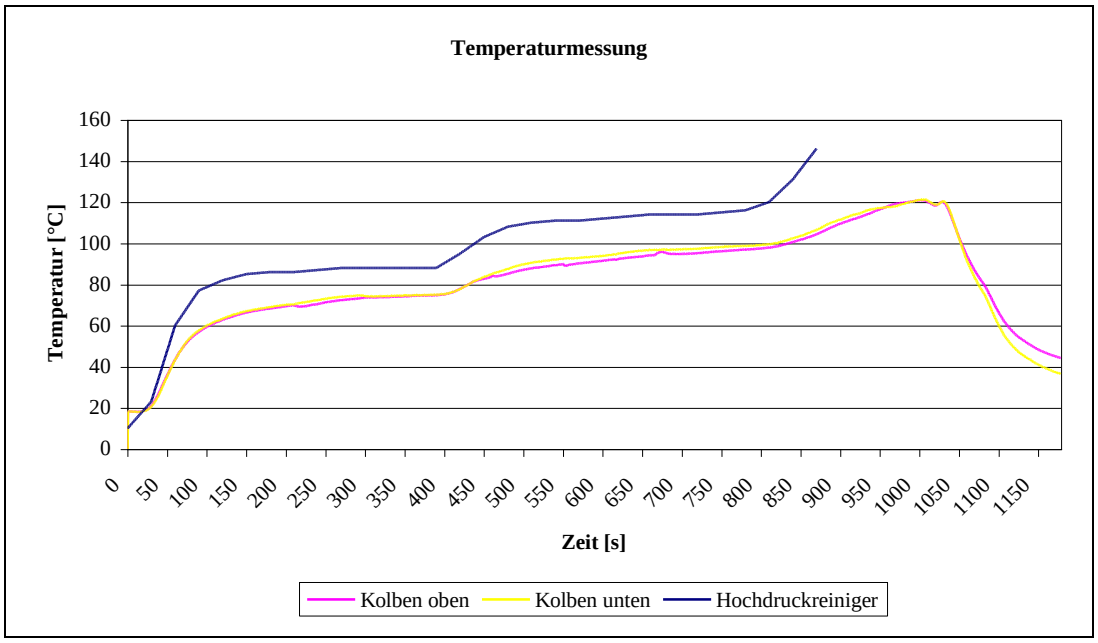


Bild 11.21 Temperaturverlauf am Kolben

Versuchsergebnis:

Wie in Bild 11.22 erkennbar ist, stieg die Temperatur zu Beginn des Versuchs sehr stark an. Danach erreichte die Temperatur am Kolben näherungsweise 77°C. Die Temperatur des HDR betrug dabei 88°C. Diese Differenz ist auf die Drosselung zwischen HDR, dem Kolben und der Umgebung zurückzuführen. Nach 360s wurde die Drosseleinstellung verstellt. Nach einer relativ geringen Ansprechzeit stellte sich eine Temperaturen von 97°C am Kolben bzw. von 115°C am HDR ein. Nach einer weitern Veränderung der Einstellungen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist am Kolben eine maximale Temperatur von 120°C zu erzeugen.

11.5.2 Heizversuch 2

Versuchsskizze:

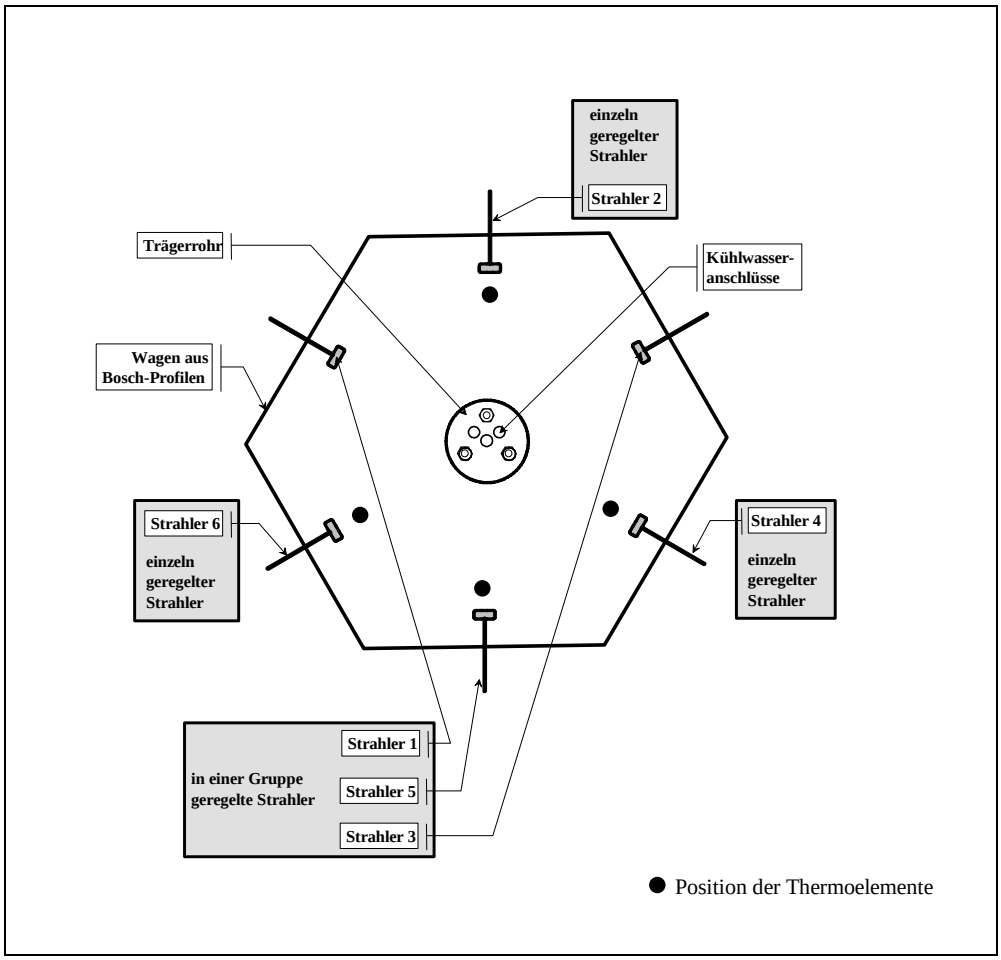


Bild 11.22 Versuchsaufbau

Versuchsaufbau:

Als Strahler wurden mittelwellige Strahler der Firma Heraeus verwendet [11.6.1]. Sie besitzen jeweils eine Leistung von 2000W.
Zur Regelung der Strahler 1, 3 und 5 wurde ein Gruppenregler mit drei Kanälen eingesetzt.. Dieser Regler besitzt die Eigenschaft, bereits ca. 50 °C vor Erreichen der eingestellten Solltemperatur die Leistung der Strahler herunter zu regeln. Dadurch soll ein Überschwingen verhindert werden. Zur Temperaturerfassung wurde ein NiCr-Ni-Thermoelement verwendet, dessen Ende in einem Abstand von ca. 2~3 cm vor Strahler 1 angebracht wurde. Die Strahler 2, 4 und 6 wurden einzeln geregelt. Die hier verwendeten Regler schalten im Gegensatz zum Gruppenregler die Strahler erst bei Erreichen der Solltemperatur ab. Auch hier wurden NiCr-Ni-Thermoelemente zur Temperaturerfassung verwendet. Die Thermoelemente aller Strahler wurden direkt mit dem jeweiligen Regler verbunden. An diesen Reglern kann zur Kontrolle die Temperatur T_{Regler} abgelesen werden.

Zusätzlich wurde vor jedem Strahler ein weiteres Thermoelement angebracht. Sie dienen zur automatischen Temperaturaufzeichnung mit Hilfe eines Meß-PC´s ($\Rightarrow T_{Strahler}$).
Die beiden Temperaturen T_{Regler} und $T_{Strahler}$ können auf diese Weise miteinander verglichen und die Funktionsweise der Regler überprüft werden.

Weitere Spezifikationen waren:

- Die eingestellte Solltemperatur an den Reglern betrug 200°C und die Leistung 100%.
- Die Heizung wurde so positioniert, dass der Kolben und das Trägerrohr beide Flansche verschließen.
- Auf dem Trägerrohr wurde Isolationsmaterial zum Schutz vor der Strahlung angebracht.

Versuchsdurchführung und –beobachtung:

Etwa 120 Sekunden nach Beginn der Datenaufzeichnung wurden gleichzeitig alle Heizstrahler eingeschaltet. Bereits nach 60 Sekunden war ein Anstieg der Temperatur auf Werte zwischen 82 °C an Strahler 5 (unten) und 125 °C an Strahler 3 zu verzeichnen.
Der Strahler 2 erreichte 150s nach Einschalten der Heizung seine Solltemperatur. Er wurde abgeschaltet. Etwa 30s später zeigte auch die Temperaturmessung für die Strahler 1 und 3 die Solltemperatur an. Da die Strahler 1, 3, und 5 über einen Gruppenregler gesteuert wurden, schalteten diese komplett ab.
Zu diesem Zeitpunkt war bereits eine deutliche Temperaturschichtung zu erkennen. Die oben liegenden Thermoelemente an den Strahlern 1 bis 3 zeigten eine deutlich höhere Temperatur als die weiter unten liegenden Strahler 4 und 6 an (Bild 11.52). Die niedrigste Temperatur lag dementsprechend am Strahler 5 (T_{max5} =133°C) vor.
Strahler 6 heizte durchgehend, trotzdem stieg hier die Temperatur nicht über 186 °C an.

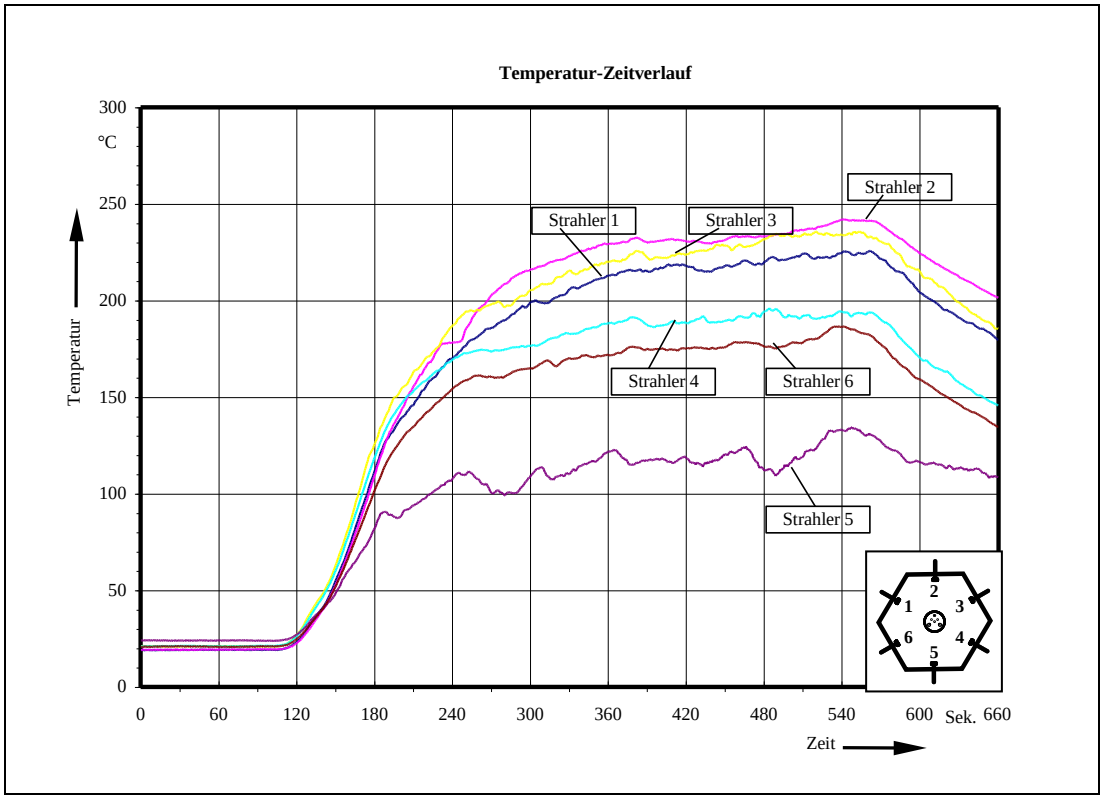


Bild 11.23 Temperatur-Zeitverlauf

Zeit [sec]	$T_{Strahler\ 1}$ [°C]	$T_{Strahler\ 2}$ [°C]	$T_{Strahler\ 3}$ [°C]	$T_{Strahler\ 4}$ [°C]	$T_{Strahler\ 5}$ [°C]	$T_{Steahler\ 6}$ [°C]
180	111,61	109,20	125,52	118,52	81,99	101,57
210	145,76	155,56	163,21	153,10	94,11	134,81
240	169,96	178,14	186,92	169,42	107,60	154,28
270	185,83	202,65	198,09	173,48	100,40	160,29
300	199,05	216,05	205,45	176,47	108,85	164,84
330	205,79	223,03	215,37	183,00	110,07	170,21
360	212,90	229,17	220,01	188,19	121,85	171,89
390	215,44	229,99	222,20	187,34	117,12	174,97
420	217,97	230,60	223,85	188,41	118,52	175,12
450	218,12	231,30	228,37	189,47	120,38	175,73
480	219,71	233,26	231,60	194,17	112,51	176,31
510	224,19	236,25	233,71	192,31	119,01	178,51
540	224,71	241,83	234,04	194,02	133,02	186,26
570	221,48	239,30	230,47	190,36	127,28	177,47
600	204,27	224,38	215,12	170,40	116,51	159,16
630	191,08	212,41	199,16	157,77	112,91	146,50
660	179,76	201,76	185,70	145,93	108,85	134,65

Tabelle 11.1 Temperaturverteilung

Zeit [sec]	$T_{Strahler\ 1}$ [°C]	$T_{Regler\ 1}$ [°C]	$T_{Strahler\ 2}$ [°C]	$T_{Regler\ 2}$ [°C]	$T_{Strahler\ 3}$ [°C]	$T_{Strahler\ 4}$ [°C]	$T_{Regler\ 4}$ [°C]	$T_{Strahler\ 5}$ [°C]	$T_{Strahler\ 6}$ [°C]	$T_{Regler6}$ [°C]
100	19,18		19,54	34	20,97	21,26	34	23,89	20,92	35
175	101,54		98,64	100	117,74	109,18	106	75,07	93,06	95
200	138,59	140	142,28	155	153,39	145,99	150	88,10	127,42	132
225	159,86	160	170,03	187	173,44	162,04	168	100,98	145,09	150
265	184,70	200	198,13	216	196,84	174,40	181	104,55	160,59	162
325	202,86		221,26	235	212,59	182,64	191	109,31	168,68	177
375	215,50		230,33	243	222,42	190,12	197	116,66	175,43	180
535	222,97		240,61	255	233,71	193,23	200	132,23	186,66	188

Tabelle 11.2 Temperaturvergleich zwischen Regler und Meß-PC

Versuchsergebnis:

Es war deutlich zu erkennen, dass bereits nach kurzer Zeit eine starke Schichtung der Temperaturverteilung in der Versuchseinrichtung vorlag. Dies ist auf die geschlossene Anordnung der Versuchseinrichtung zurückzuführen. Sie bedingt einen Hitzestau im oberen Bereich der Heizungstrommel.
Die über den PC aufgezeichneten Temperaturwerte zeigten z.T. eine erhebliche Abweichung von den an den Reglern angezeigten Werten ab. Es konnten Unterschiede bis 18 °C festgestellt werden (Bild 11.24).
Dieses Phänomen ist durch die verwendeten Thermoelemente zu erklären. Sie sind nicht in der Lage die von den Strahlern emittierte Strahlungswärme aufzunehmen. Es lag folglich eine konvektive Temperaturmessung vor.
Des weiteren war feststellbar, dass die Gruppenregelung der Strahler 1, 3 und 5 unpraktikabel ist. Durch die rein konvektive Temperaturmessung sowie die gemeinsame Regelung der Strahler über ein Thermoelement am höher liegenden Strahler 1 ist keine gezielte Temperaturregelung über den Umfang verteilt möglich.

Verbesserungsmöglichkeiten:

- Um eine Verbesserung der Temperaturverteilung innerhalb der Versuchseinrichtung zu erreichen, besteht die Möglichkeit an den Stirnflächen Ventilatoren anzubringen.
- Die Versuchseinrichtung sollte um 30° gedreht werden. Dadurch wäre eine verbesserte Regelung der Strahler möglich. Durch die Drehung der Heiztrommel würde außerdem eine Verschmutzung und Beschädigung des unten liegenden Strahlers durch abtropfendes Matrixmaterial vermieden.
- Da die vorhandenen Thermoelemente nur eine konvektive Temperaturmessung ermöglichen und für die gezielte Aufheizung des Rohres nur Strahlungswärme dienen soll, ist eine bessere Erfassung der Strahlung durch die Thermoelemente zu realisieren.

11.5.3 Heizversuch 3

Versuchsziel:

Ermittlung der Temperaturverteilung am isolierten Trägerrohr.

Versuchsskizze:

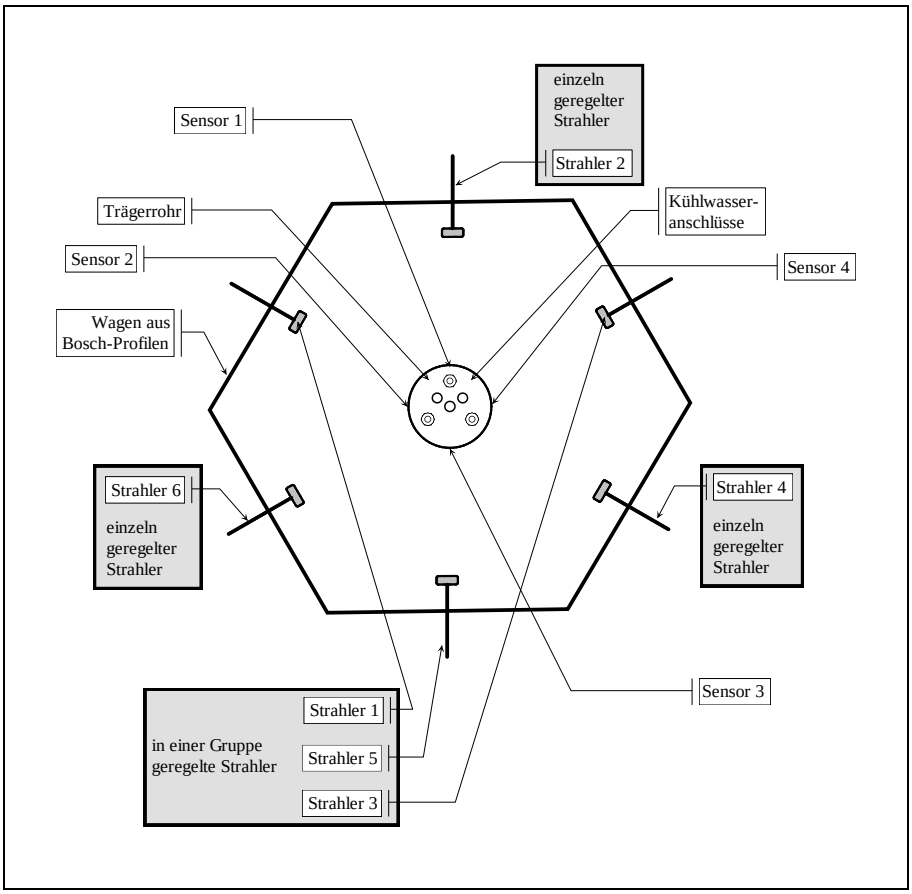


Bild 11.24 Anordnung der Strahler und Thermoelemente

Versuchsaufbau:

Der Grundaufbau ist identisch mit dem Heizversuch 1.
Die sechs zusätzlich angebrachten Thermoelemente an den Strahlern wurden aber entfernt. Statt dessen wurden vier NiCr-Ni-Thermoelemente an der Oberfläche des isolierten Trägerrohres befestigt (Sensor 1-4). Sie sind ebenfalls an den Meß-PC angeschlossen und werden automatisch ausgewertet. Gleichzeitig werden die angezeigten Temperaturwerte der Regler notiert.
Die Solltemperatur der Regler wurde von 200°C im ersten Heizversuch auf 250°C angehoben. Die maximale Leistung der Regler zur Reduktion der Strahlungswärme lag bei 100%.

Versuchsdurchführung und –beobachtung:

Zu Beginn erfolgte die Erwärmung des Trägerrohres zunächst gleichmäßig. Nach etwa 60 Sekunden stellte sich ein Temperaturgradient innerhalb der Heizungstrommel ein.
Die an der Rohrunterseite gemessene Temperatur stieg langsamer an als an den drei anderen Stellen.. Die maximale Temperatur am Sensor 3 war mit 224 °C erreicht.
Die an der Rohroberseite gemessene Höchsttemperatur betrug 245 °C, während sich an den Seiten der Rohre Temperaturen von 252 °C bzw. 257 °C einstellten.

Gleichzeitig wurden die Abschaltzeiten der einzelnen Heizstrahler beobachtet. Die Reglergruppe 1 (Strahler 1, 3 und 5) reduzierte die Leistung bereits nach 125 Sekunden bei einer Temperatur von ca. 170°C an Strahler 1 um 100%. Hier begann eine kontinuierliche Regelung der einzelnen Strahler, so dass hier die Temperatur nie über den Sollwert anstieg.
Strahler 2 schaltete sich nach 160 Sekunden bei einer Temperatur von ca. 250 °C (Sollwert) ab.
Nach ca. 330 Sekunden wurden alle Heizungen abgeschaltet. Die Temperatur in der Heizungstrommel sank daraufhin gleichmäßig.

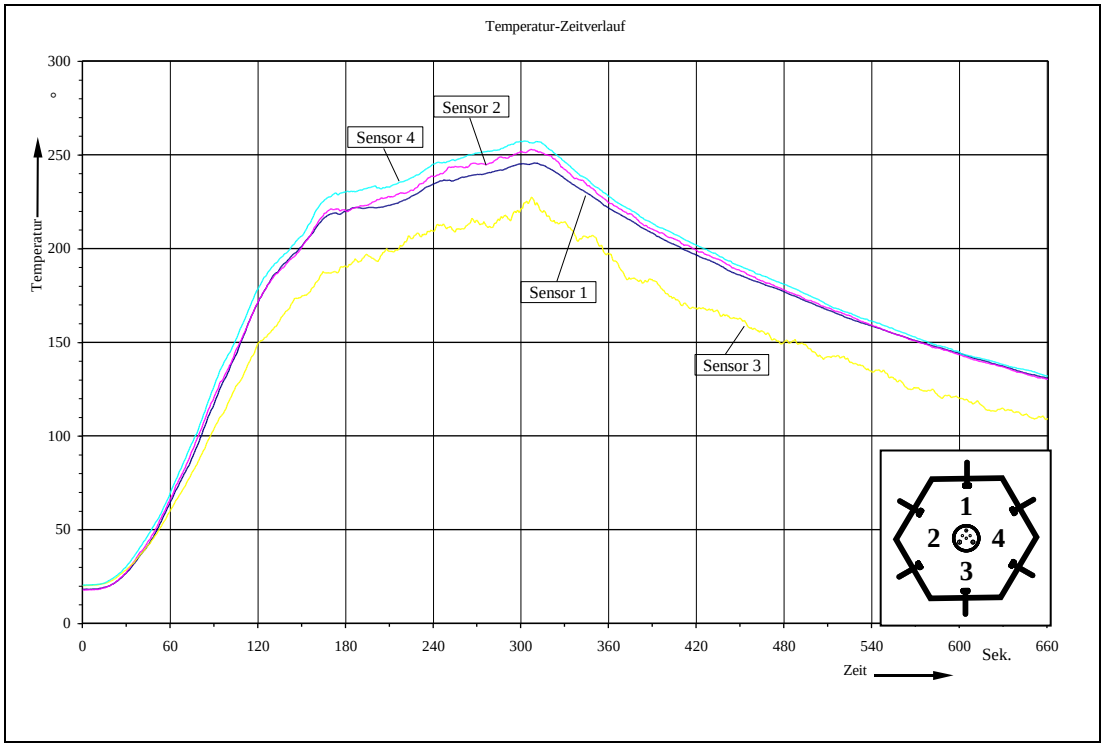


Bild 11.25 Temperatur-Zeitverlauf am Trägerrohr

Zeit [sec]	$T_{Sensor1}$ [°C]	$T_{Sensor2}$ [°C]	$T_{Sensor3}$ [°C]	$T_{Sensor4}$ [°C]	$T_{Regler1}$ [°C]	$T_{Regler2}$ [°C]	$T_{Regler4}$ [°C]	$T_{Regler6}$ [°C]
0	18,26	17,74	20,15	20,41	20	33	33	33
30	26,93	27,29	28,63	30,45	40	45	50	43
60	64,83	66,51	60,31	69,63	80	82	90	80
90	117,23	121,01	104,04	126,76	130	139	139	125
120	171,19	171,64	149,69	178,55	160	194	188	165
150	201,24	200,63	174,78	206,59	210	238	210	188
180	219,95	219,92	190,50	230,12	220	263	222	200
210	223,00	227,49	198,55	232,75	230	272	225	205
240	234,45	238,45	209,17	244,92	240	285	232	215
270	239,51	245,04	214,79	250,94	250	289	235	220
300	245,13	251,90	221,38	257,13	250	294	239	222
330	237,26	242,11	214,27	246,05	240	280	217	198
360	221,51	224,50	197,18	227,59	230	266	200	190
390	208,23	210,34	182,96	213,37	210	250	191	171
420	196,58	199,17	168,22	201,77	210	242	175	162
450	185,83	188,12	162,85	190,60	190	232	165	152
480	176,86	177,96	150,03	180,90	190	222	157	144
510	167,13	168,32	142,40	169,85	170	213	147	133
540	158,70	159,01	134,25	161,18	160	203	140	127
570	150,86	150,62	125,86	152,58	150	195	132	121
600	144,09	143,44	120,06	144,77	140	187	125	117
630	137,13	136,52	114,51	138,08	130	181	120	112
660	130,90	130,29	109,17	131,98	130	173	113	107

Tabelle 11.3 Temperaturvergleich zwischen Regler und Trägerrohr

Versuchsergebnis:

Auch bei diesem Versuch stellte sich wieder eine Temperaturschichtung innerhalb der Heizung ein. Sie war bei der Messung am Rohr jedoch nicht so stark ausgeprägt wie der Temperaturgradient am Rand. Das frühe Abschalten der Reglergruppe 1 nach 125 Sekunden stellte sich aufgrund einer Verstärkung der Temperaturschichtung als problematisch dar.

11.6 Sonstiges

11.6.1 Versuche bei der Firma HERAEUS

In Zusammenarbeit mit den Anwendungstechnikern der Firma HERAEUS–NOBLELIGHT in Kleinostheim wurden Versuche zur Auswahl der passenden Heizung durchgeführt.
Die Ausgangsüberlegung ist, das trocken bewickelte PA-Kernrohr entweder mit Hilfe einer Umluftheizung oder mit Infrarotstrahlung zu erwärmen. Während das Prinzip der Umluftheizung seit langem bekannt ist, stellt das Erwärmen mit der NIR-Technik (Near-Infrared-Radiation) eine Neuerung dar. Ziel des Einsatzes der NIR-Technik ist es, mit dem Eindringen der Strahlung in das Material eine möglichst gleichmäßige und schnelle Erwärmung zu erzielen. Entsprechend wurden bei den Versuchen kurzwellige Halogenstrahler mit einem Intensitätsmaximum bei 1,2 µm eingesetzt. (siehe auch Kapitel 9)
Erwärmt wurden die am Fachgebiet bewickelten Proberohre mit dem PA6/PA12-Kernrohr und einer PA12/E-Glas Wicklung. Bei der Wicklung handelt es sich um zwei AWV´s mit +/- 10° (Schichtdicke 0,6mm) und +/- 60° (Schichtdicke 1,8mm). Der Faservolumenanteil in der Hybridfaser betrug 32%.

1.Versuch:

Versuchsskizze:

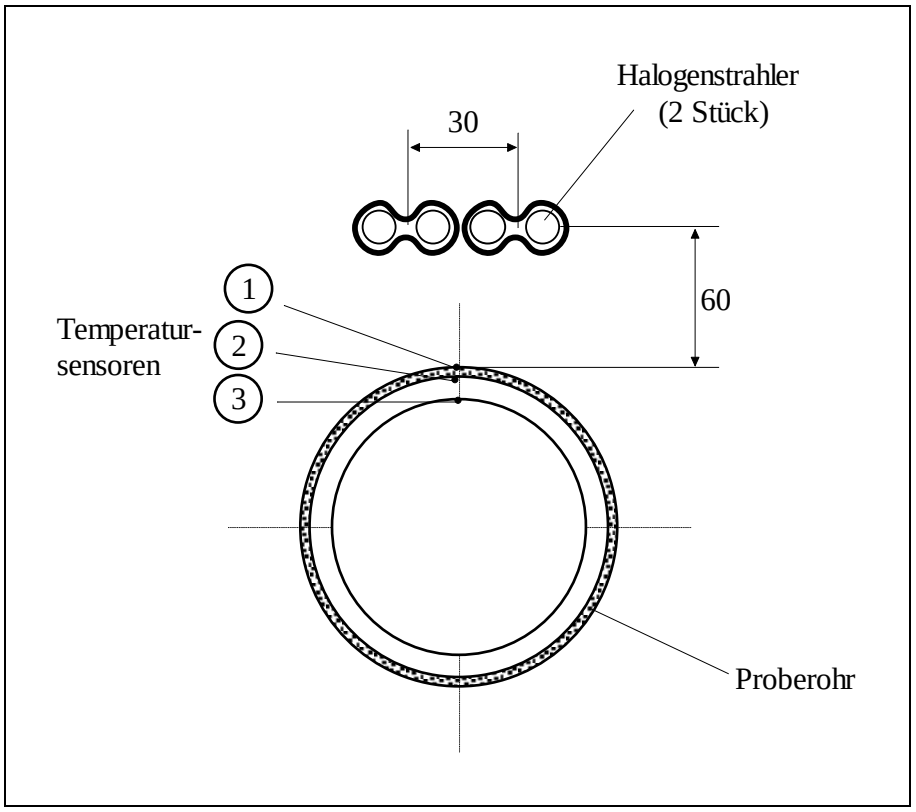


Bild 11.26 Versuchsaufbau Versuch 1

Versuchsbeobachtung:

Schon 18s nach dem Einschalten der Heizung wird an der Oberfläche der Wicklung eine Temperatur von 220°C gemessen. Die Heizleistung muss von 60W/cm² auf 20-15W/cm² zurückgenommen werden.
Nach 280s werden an der Oberfläche des Kernrohres 200°C erreicht. Die Innentemperatur des Rohres beträgt zu diesem Zeitpunkt 75°C.
Die Oberfläche des Versuchsrohres verfärbt sich braun.

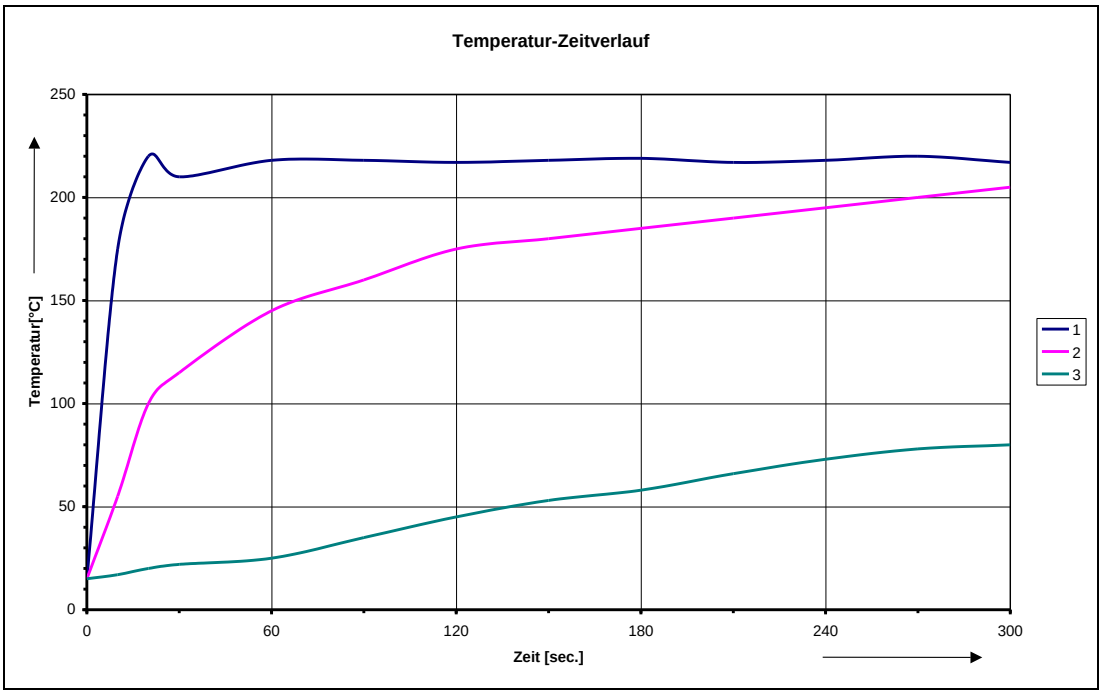


Bild 11.27 Vergleich der Temperatursensoren beim 1.Versuch

2. Versuch:

Versuchskizze:

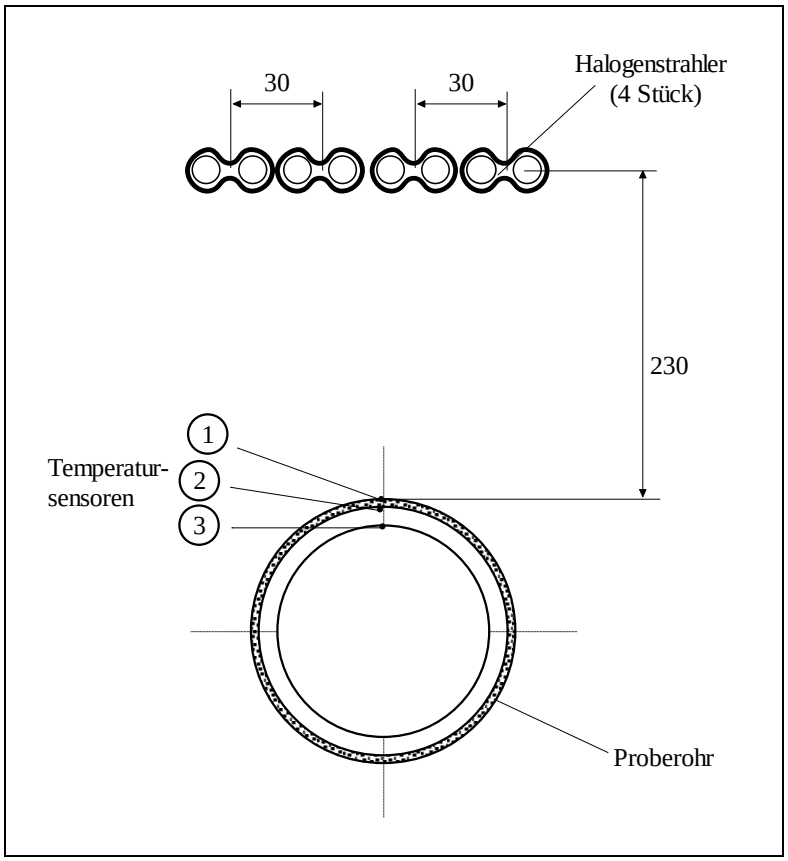


Bild 11.28 Versuchsaufbau Versuch 2

Versuchsbeobachtung:

Es werden alle vier Strahler mit voller Leistung betrieben, um die Tiefenwirkung der kurzwelligen Strahlung auszunutzen. Der Temperatur-Zeitverlauf zeigt jedoch keine Steigerung des Gradienten im Temperaturverlauf an der Oberfläche des Kernrohres (Temperatursensor 3).
Nach 130s wird an der Oberfläche der Wicklung eine Temperatur von 220°C gemessen und die Heizleistung muss reduziert werden. Nach 210s beträgt die Temperatur an der Oberfläche des Kernrohres 140°C. Der Versuch wird abgebrochen.

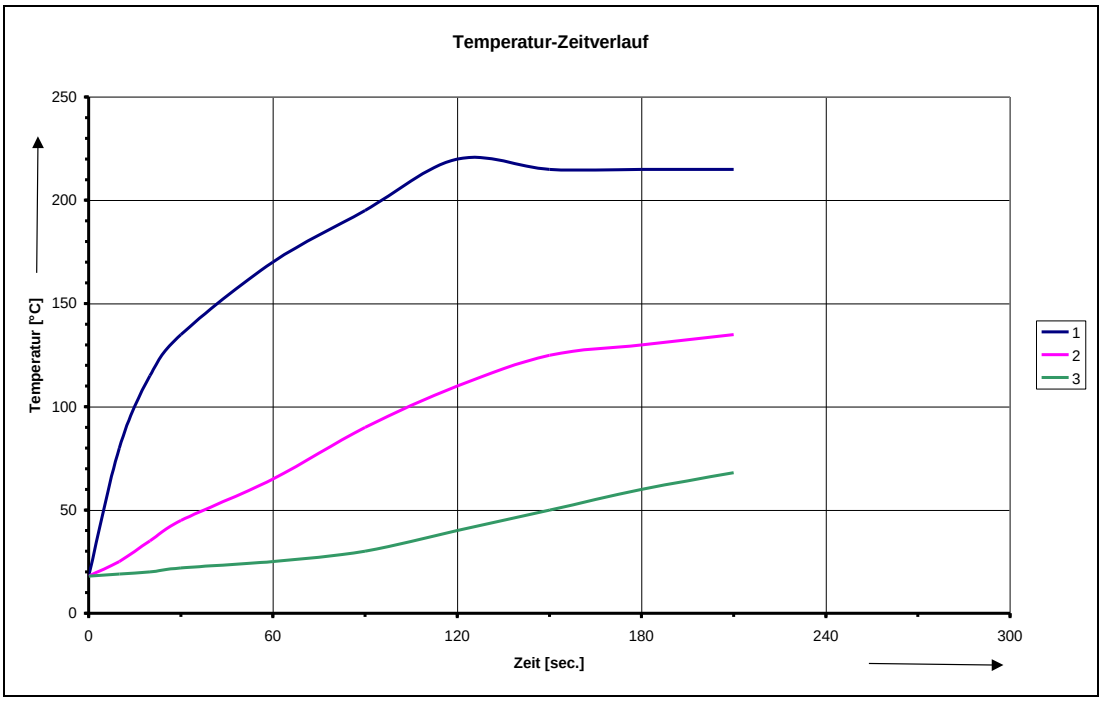


Bild 11.29 Vergleich der Temperatursensoren beim 2.Versuch

3. Versuch:

Versuchsbeschreibung:

Es handelt sich um den gleichen Versuchsaufbau wie beim ersten Versuch. Das Versuchsrohr wird jedoch in einem Umluftofen auf eine Temperatur von 180°C vorgewärmt und dann durch die Halogenstrahler bis auf die Schmelztemperatur der PA-Matrix erwärmt.

Versuchsbeobachtung:

Die Erwärmung des Versuchsrohres im Umluftofen erfolgt extrem langsam. Erst nach einer Zeit von 35 min. ist das Kernrohr auf eine Temperatur von 180° C erwärmt. Bei der Entnahme aus dem Umluftofen ist das Versuchsrohr schon sehr deutlich braun verfärbt.
Die anschließende Erwärmung auf 220°C am der Außenoberfläche der Wicklung muss abgebrochen werden, da sich die Temperatursensoren gelöst haben und so keine Kontrolle über den Aufheizvorgang mehr möglich ist.

Diskussion der Ergebnisse

- Eine Vorwärmung durch Umluft ist wegen der geringen Aufheizgeschwindigkeit nicht sinnvoll.
- Der Einsatz von kurzwelligen Halogenstrahlern bringt den größten Gradienten bei der Erwärmung. Die Heizleistung muss aber nach kurzer Zeit heruntergeregelt werden. Die Strahler werden dann im mittelwelligen Bereich betrieben.
- Die Erwärmung im Umluftofen zeigt, dass schon bei der Vorwärmung des Versuchsrohres deutlich unterhalb der Schmelztemperatur eine starke Oxidation der Wicklung vorliegt. In den weiteren PAZ-Versuchen wird dies zunächst hingenommen werden müssen. Über den Einsatz von oxidationshemmenden Mitteln ist eventuell nach ersten PAZ-Versuchen zu entscheiden.

Endgültige Auswahl

Die ideale Lösung besteht aus einer Kombination von mittelwelligen Infrarotstrahlern zur Vorwärmung und kurzwelligen Halogenstrahlern zur schnellen Zuführung der benötigten Schmelzenergie. Bei den angestrebten Rohrdurchmessern und den erforderlichen Strahlerabständen zu den Versuchsrohren müssen zu einer gleichmäßigen Erwärmung ohne Drehvorrichtung der Heizung min. 12 Strahler auf den Umfang angeordnet werden.
Die Gesamtlänge der Heizstrecke sollte 500 mm betragen (350 mm Infrarot, 150 mm Halogen, Vorschub max. 2,5 mm/sec.).
Aus Kostengründen werden jedoch in der Versuchseinrichtung nur 6 Strahler aus dem Bereich „schnelle Mittelwelle“ mit einer Strahlerlänge von 500 mm eingesetzt. Diese geringe Anzahl von Strahlern zieht jedoch nach sich, dass eine Drehvorrichtung vorzusehen ist. Die Strahler diesen Typs haben dafür den Vorteil, dass sie deutlich robuster als die kurzwelligen Halogenstrahler sind.

11.6.2 Knickgefahr der Kolbenstange

Die Kolbenstange wird im Betrieb auf Druck beansprucht. Die sich ergebende Druckkraft errechnet sich aufgrund des Seiltriebes aus der doppelten Zugkraft im Seil. Bei einer angenommen Zugmasse von 300kg bedeutet dies eine Druckkraft von 5886N. Nach Rücksprache mit dem Hersteller liegt die maximale Knicklast der Kolbenstange bei 19600N. Aus Sicherheitsgründen wird trotzdem auf eine entsprechende Führung der Kolbenstange nicht verzichtet.
Nachfolgend sind die Eigenschaften des Hydraulikzylinders aufgelistet:

Hersteller	HEB Hydraulik-Elementbau GmbH
Kennziffer	Z100-104-63/32/1000-206
Maximaler Betriebsdruck	100bar
Maximale Knicklast	1960daN
Betriebsdruck bei max. Knicklast	63bar

Tabelle 11.4 Spezifikationen des Hydraulikzylinders

11.6.3 Anforderungsliste

a) Versuchseinrichtung

Konstruktion allgemein		
FF	Verfahrensablauf grundsätzlich beibehalten	
FF	Investitionskosten möglichst gering halten	
FF	Verwendung vorhandener Bauteile	
FF	Kein Ringspalt oder variabler / versetzter Ringspalt in der V.E.	
WF	Kontinuierliche Fertigung berücksichtigen (⇒ möglichst hohe Vorschubgeschwindigkeit)	
Innenbereich		
FF	Leistungsfähiges Temperiergerät, Temperatur frei wählbar	
FF	Variabler, modularer Aufbau des Innenbereiches, möglichst geringer Montageaufwand	
WF	Konstruktion muss auch für andere Geometrien anwendbar sein	
Außenbereich		
WF	Möglichst Verzicht auf eine Außenkokille	
WF	Konstruktion muss auch für andere Geometrien anwendbar sein	

Tabelle 11.5

b) Kernrohr

Geometrie des Liners		
FF	Länge des Kernrohres	1320 mm
RE	Außendurchmesser des Kernrohres	94 mm
RE	Wanddicke	5,0 mm
WF	Kernrohr mit geringen Toleranzen, notfalls nacharbeiten	+/- 0,1mm
FF	Geradheit des Kernrohres	
ZF	Kalibrierverfahren (Außenkalibrierung / Innenkalibrierung) der Rohre wird als Parameter festgehalten	3mm/m
Material des Kernrohres		
FF	Polyamid Mischpolymerisat aus PA6 und PA12 3-4mm PA6 innen, 1-2mm PA12 außen	PA6/PA12
RE	Rohre feingedreht	
Wicklung		
FF	Auslegen auf Belastung durch Innendruck	
RE	+/- 10° AWV	+/-010°
RE	Eine Faserlage +/- 60°	+/- 60°
Material der Wicklung		
FF	Hybridfaser PA/E-Glas	
RE	Faservolumenanteil	32%
RE	Stärke des Rovings	375 tex
FF	Außenabzug von Spule	

Tabelle 11.6

c) Kolben

Grundsätzliche Anforderungen	
FF	Berücksichtigung der kontinuierlichen Fertigung
FF	Variabler, modularer Aufbau des Innenbereiches, möglichst geringer Montageaufwand
WF	Konstruktion muss auch für andere Geometrien anwendbar sein
FF	Geringes Kolbengewicht
FF	konstante Temperatur im Aufweitbereich durch leistungsfähiges Temperiergerät, Temperatur frei wählbar (⇒ Einsatz des HDR)
FF	Gleichmäßige Temperaturverteilung über dem Umfang
Anforderungen an die Außenkontur	
FF	Zentrierung und Führung des Versuchsrohres durch den Kolben
FF	Möglichst glatter, polierter Aufweitbereich eventuell mit Beschichtung
FF	Kalibrier- bzw. Kühlbereich mit Beschichtung aus PTFE
Anforderungen an die innere Struktur des Kolbens	
FF	Aufweit- und Kalibrierbereich mit guter Wärmeleitung und hoher Festigkeit
FF	Thermische Trennung und Isolierung der verschiedenen Temperaturbereiche im Innendorn, Verwendung von Brandenburgerplatten
W	Isolationsplatte aus PEEK
W	Gleichmäßige Temperaturverteilung am Kolbenumfang
W	Dichtung durch achsiale / radiale O-Ringe

Tabelle 11.7

d) Trägerrohr

Grundsätzliche Anforderungen	
FF	Einfache Montage und Demontage
FF	Möglichst große Länge
FF	Leiten des temperierten Wassers zum Aufweitdorn
Mechanische Anforderungen	
FF	Starre Befestigung des Kolbens
FF	Ausreichende axiale Festigkeit (Leiten der Zugkräfte)
WF	Hohe Biegesteifigkeit (⇒ geringe Absenkung des Kolbens)

Tabelle 11.8

e) Heizung

Mechanische Anforderungen	
FF	Variabler radialer Abstand der Strahler
FF	Variable horizontale Position der Strahler zum Kolben
WF	Variable Anordnung der Strahler am Umfang
WF	Jeder Strahler unabhängig von den anderen einstellbar.
Thermische Anforderungen	
WF	Hohe Effektivität der Strahler
WF	Strahlungsverluste minimieren
FF	Natürliche Konvektion vermeiden
Elektrische Anforderungen	
WF	Schnelle Regelung der Strahlerleistung ermöglichen
Anforderungen an die Strahler	
FF	Ausreichende Leistung
WF	Schnelle Regelung möglich
FF	Keine Oxidation der Rohroberfläche

Tabelle 11.9

f) Wickelvorrichtung

Anforderungen beim Herstellen des Kernrohres	
FF	Aufspannen und Zentrieren des Kernrohres auf der fachgebietseigenen Wickelmaschine
FF	Trockene Bewicklung mit dem Hybridroving ermöglichen
Anforderungen beim Einsatz in der V.E.	
FF	Einleiten der Zugkräfte in das Versuchsrohr

Tabelle 11.10

g) Abzugsvorrichtung

Grundsätzliche Anforderungen	
FF	Erzeugen der benötigten Abzugskräfte
FF	Leiten der Abzugskräfte zum Versuchsrohr
WF	Stützen des Versuchrohres nach Verlassen des Umformbereichs

Tabelle 11.11

11.7 Stückliste und sonstige Aufstellungen

11.7.1 Stückliste Kolben

Anzahl	Bezeichnung	Abmessungen	Werkstoff
1	Trägerplatte	Rundmaterial D=90, L=150	Aluminium
3	Zuganker	Rundmaterial D=10, L=400	Edelstahl
2	Distanzscheiben	Rundmaterial D=25, L=50	Edelstahl
1	Düse_heiß	Rundmaterial D=20, L=200	Messing
1	Verdränger_heiß	Rundmaterial D=60, L=150	Sintimid
1	Aufweitdorn	Rohr D_i=60 D_a=90, L=250	Aluminium
1	Isoplatte	Rundmaterial D=90, L=100	Sintimid
1	Kalibrierzylinder	Rohr Di=60 D_a=90, L=250	Aluminium
1	Düse_kalt	Rundmaterial D=20, L=200	Messing
1	Verdränger_kalt	Rundmaterial D=60, L=150	Sintimid
1	Endplatte	Rundmaterial D=90, L=50	Aluminium
3	Dichtscheibe_Zuganker	Rundmaterial D=20, L=50	Edelstahl
1	Adapter (Ermeto L10)	Rundmaterial D=20, L=60	Messing

Tabelle 11.12

11.7.2 Stückliste Heizung

Anzahl	Bezeichnung	Abmessungen
2	Flansch	D=250mm
4	Lagerhalterung	Vollmaterial 50x50x200
12	Strahlerhalterung	
12	Strahlerstange	
12	Strahlerklemmung	

Tabelle 11.13

11.7.3 Stückliste Zugvorrichtung und Sicherung gegen Knicken

Anzahl	Bezeichnung	Abmessungen
1	Seilrolle	
1	Achse	
1	Hülse	
1	Halterung_Rolle	
2	U-Führung	
1	Seil (fertig konfektioniert)	10m

Tabelle 11.14

11.7.4 Stückliste Dichtungen

Anzahl	Bezeichnung	Abmessungen	Position
2	O-Ring (aus SIMRIT 83 FKM 592)	64 x 3,0	Trägerplatte und Endkappe
2	O-Ring (aus SIMRIT 83 FKM 592)	70 x 2,0	an ISO-Platte außen
4	O-Ring (aus SIMRIT 83 FKM 592)	5,28 x 1,78	an ISO-Platte innen
2	O-Ring (aus SIMRIT 83 FKM 592)	10 x 2,0	an den Düsen
3	O-Ring (aus SIMRIT 83 FKM 592)	8 x 2,0	an den Zugankern

Tabelle 11.15

11.7.5 Stückliste Ermeto-Produkte

Anzahl	Bezeichnung	Abmessungen	Bestellnummer
3	Edelstahlrohre L 10	L=1500, t=2 (Katalog S. I 4)	
2	Einschraubverschraubungen L10, Rohrgewinde 1/4 '', Kunststoffdichtung (für Ablauf rechts)	siehe Katalog Seite C 9	GE-10-PLR-ED
3	Gerade Verschraubungen L 10 (Zu- und Abläufe links)	siehe Katalog Seite C 2	G-10-PL
Anmerkung: Der Zulaufschlauch wird direkt rechts auf Adapter_Ermeto aufgeschraubt			

Tabelle 11.16

11.7.6 Stückliste Bosch-Teile

Anzahl	Bezeichnung	Abmessungen
4	Profil 30 x 30	L=2200
3	Profil 30 x 30	L=2500
4	Profil 45 x 45	L=1600
3	Profil 45 x 45	L=2250

Tabelle 11.17

11.7.7 Profilaufteilung Bosch-Teile

a) Profil 30 x 30, L=2200

Profil Nr.	Zuschnittsmaße	Gesamtlänge
1	2 x 1090	L=2180
2	2 x 1090	L=2180
3	2 x 1090	L=2180
4	6 x 280 / 1x 420	L=2100

Tabelle 11.18

b) Profil 30 x 30, L=2500

Profil Nr.	Zuschnittsmaße	Gesamtlänge
1	5 x 420 / 1 x 280	L=2380
2	5 x 420 / 1 x 280	L=2380
3	4 x 600	L=2400

Tabelle 11.19

c) Profil 45 x 45, L=1600

Profil Nr.	Zuschnittsmaße	Gesamtlänge
1	1 x 1600	L=1600
2	1 x 1600	L=1600
3	1 x 1600	L=1600
4	1 x 1600	L=1600

Tabelle 11.20

d) Profil 45 x 45, L=2250

Profil Nr.	Zuschnittsmaße	Gesamtlänge
1	2 x 500 / 2 x 600	L=2250
2	2 x 500 / 2 x 600	L=2250
3	2 x 500 / 2 x 600	L=2250

Tabelle 11.21

11.8 Zeichnungen

Reihenfolge der technischen Zeichnungen:

1. **Kolben**
    a) Aufweitdorn
    b) Kalibrierzylinder
    c) Trägerplatte
    d) Endplatte
    e) Düse_heiß (Düse Aufweitbereich)
    f) Düse_kalt (Düse Kalibrierbereich)
    g) Verdränger_heiß (Verdränger Aufweitbereich)
    h) Verdränger_kalt (Verdränger Kalibrierbereich)
    i) Isolationsplatte
    j) Zuganker
    k) Distanzscheibe
    l) Dichtscheibe
    m) Adapter Ermeto_L10

2. **Trägerrohr**
    a) Verankerung
    b) Trägerrohr

3. **Heizung**
    a) Flansch_Heizung
    b) Lagerhalterung
    c) Strahlerstange
    d) Strahlerklemmung
    e) Strahlerhalterung

4. **Zugvorrichtung**
    a) Querträger
    b) Achse_Rolle
    c) Halterung_Rolle

5. **Wickelvorrichtung**
    a) Wickelkranz_vorne (Stiftkranz vorne)
    b) Wickelkranz_hinten (Stiftkranz hinten)
    c) Zentrierung_vorne (Zentrierzylinder vorne
    d) Zentrierung_hinten (Zentrierzylinder hinten)
    e) Flansch

Literaturverzeichnis

1) M.Flemming ; G.Ziegmann ; S.Roth: *Faserverbundbauweisen Halbzeuge und Bauweisen*. Springer-Verlag, 1996
2) Saechtling: *Kunststoff Taschenbuch*. Hanser-Verlag, 1992
3) Dubbel; Herausgeber: W.Beitz ; K.H.Grote: *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag, 1997
4) Hütte; Herausgeber: H.Czichos: *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. Springer-Verlag, 31.Auflage
5) Herausgeber: Hubert Gräfen: *Werkstofftechnik*. VDI-Verlag, 1993
6) Hauger ; Schnell ; Gross: *Technische Mechanik Band 2*. Springer-Verlag, 1993
7) Hans-Peter Zepf und 9 Mitarbeiter: *Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix*. Kontakt & Studium Band 529. Expert-Verlag, 1997
8) M.Klein: *Einführung in die DIN-Normen*. B.G.Teubner-Verlag, 1993
9) Hoischen: *Technisches Zeichnen Grundlagen • Normen • Beispiele • Darstellende Geometrie*. Cornelsen Giradet-Verlag, 1996
10) MM Maschinenmarkt Jahrg.86 S.1357: *Thermoplastisch Kunststoffe mit Licht erwärmen ; Möglichkeiten und Grenzen*. H.Potente ; K. de Zeeuw
11) KU Kunststoffe Jahrg.89 S.6 ; Carl Hanser Verlag: *Thermoformen: Schnelle Erwärmung mit dem NIR-Verfahren*. B.Gerstendörfer-Hart ; K.O.Bär
12) Ist 155/145 ABK Band 17, 1993: *Möglichkeiten und Grenzen des Wickelns ...* .
13) H.Schürmann: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden I,II*. Vorlesungsbegleitendes Skript, Darmstadt, 1998
14) H.Schürmann: Vorlesungsskript: *Konstruktiver Leichtbau I,II*. Vorlesungsbegleitendes Skript, Darmstadt, 1998
15) H.Birkhofer: *Produktentwicklung I,II*. Vorlesungsbegleitendes Skript, Darmstadt, 1998/99
16) M.Hofmann ; H.Treutler: *Konstruktion einer Vorrichtung zur Herstellung von glasfaserverstärkten Rohren mit thermoplastischer Matrix*. Darmstadt, Technische Universität, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen, Konstruktiver Entwurf S/96/07
17) D.Knoblauch ; M.Roth: *Optimierung einer Versuchseinrichtung zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Rohren mit thermoplastischer Matrix*. Darmstadt, Technische Universität, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen, Konstruktiver Entwurf, 1997
18) Bauer & Schaurte Karcher GmbH: K.H.Illgner ; D.Blume: *Schrauben Vademecum*. 1985
19) Freudenberg Dichtungs- und Schwingungstechnik: *Simrit® Standard Katalog*. Circa 1997
20) Hartmann & Braun Gerätetechnik Alzenau: *Sensytherm IR Infrarotsysteme zur berührungslosen Temperaturmessung*
21) Heraeus Noblelight GmbH: *Produktive Wärme als Programm Infrarotstrahler*. 1998
22) Heraeus Noblelight GmbH: *Infrarot Wärmeprozesse für die Kunststoffverarbeitung*. 1998
23) Heraeus Noblelight GmbH: *Infrarot Carbon Infrarot Strahler für flexible Wärmeprozesse mit hohem Wirkungsgrad*. 1999
24) Heraeus Noblelight GmbH: *Infrarot Gezielte Wärme für Kunststoffe*. 1999
25) Heraeus Noblelight GmbH: *Infrarot Air-Knife Infrarot-Module Infrarottrocknung unter intensivem Luftaustausch*. 1998

26) Heraeus Noblelight GmbH: *Ifra Light Halogen Infrarot Strahler für Wärme- und Trocknungsprozesse*. 1999
27) Heraeus Noblelight GmbH: *Lichtquellen für Produktivität Komplettkompetenz von UV bis IR*. 1998
28) Heraeus Noblelight GmbH: *Mittelwellige Bausatz-Infrarotstrahler MBS mit Zwillingsrohren aus Hanauer Quarzglas*. 1998
29) Heraeus Noblelight GmbH: *Schnelle Wege zu mehr Qualität Heraeus Infrarot-Systeme für die Automobil-Industrie*. 1998
30) Heraeus Noblelight GmbH: *Infrarot-Stativtrockner ST Mobile Wärme nach Maß*. 1997
31) Heraeus Noblelight GmbH: *Wärme nach Maß im Know-how-Pack Heraeus IR-Module KR*. 1997
32) http://www.industrieservis.com/nir-deut-01.htm