



Sonderdruck aus
nachrichten

Offizielles Organ der Kunststoffrohrverbände
Kunststoffrohrverband e.V. – Gütegemeinschaft Kunststoffrohre e.V. Bonn



1/95

**60 Jahre Erfahrungen
mit Rohrleitungen
aus weichmacherfreiem
Polyvinylchlorid (PVC-U)**

Dipl.-Ing. Reinhard E. Nowack

Dipl.-Phys. Egon Barth

Ing.-Oec. Ilse Otto

Dr. Erich W. Braun

60 Jahre Erfahrungen mit Rohrleitungen aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U)

Dipl.-Ing. Reinhard E. Nowack *)

Dipl.-Phys. Egon Barth **)

Ing.-Oec. Ilse Otto ***)

Dr. Erich W. Braun *)

Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Die Entwicklungsgeschichte der PVC-U-Rohre
- 3 Der Chemiestandort Bitterfeld und das PVC-U-Rohr
- 4 Praktische Erfahrungen
- 5 Eigenschaften der Bitterfelder PVC-U-Rohre
- 6 Hygienische und physiologische Eigenschaften
- 7 Diskussion der Untersuchungsergebnisse
 - 7.1 Ovalität
 - 7.2 Beurteilung der Rohrqualität
 - 7.3 Lebensdauererwartung
- 8 Der Konstruktionswerkstoff PVC-U
- 9 Die ökologische Position von PVC
 - 9.1 Synthese und Rohstoff
 - 9.2 Ökobilanzen
- 10 PVC-Diskussion
- 11 Zusammenfassung

1 Einleitung

Daß die Wiedervereinigung nicht nur politische Bedeutung hat, sondern auch für die Klärung technischer Entwicklungen hilfreich sein kann, ist zwar ein wenig genutzt, trotzdem aber interessanter Aspekt. Diese für eine technische Veröffentlichung ungewöhnliche Einleitung soll darauf hinweisen, daß erst durch diesen politischen Vorgang die Möglichkeit geschaffen wurde, Untersuchungen an den ersten PVC-U-Rohren, die auf der Welt hergestellt wurden, durchzuführen. Die an den zwischen 1935 und 1940 in Bitterfeld hergestellten Rohren ermittelten Eigenschaftswerte ermöglichen wertvolle Rückschlüsse auch auf die Lebensdauer von PVC-U-Rohren des derzeitigen Entwicklungsstandes.

2 Die Entwicklungsgeschichte der PVC-U-Rohre

Die Polymerisation des Polyvinylchlorids gelang Henri Regnault in G. Liebig's Labor in Gießen zwar bereits 1835, aber erst ab 1878 wurde die Polymerisierbarkeit des Vinylchlorids systematisch untersucht und von Klätte 1912 geklärt. Ihm gelang es zusammen mit Zacharias PVC im technischen Maßstab aus Azethylen und Chlorwasserstoff herzustellen. Aber erst 1928 wurde in den USA und 1930 durch die BASF in Rheinfelden mit der Produktion von PVC in technischen Mengen begonnen. Für das zu Beginn der 30er Jahre in der Größenordnung von einigen Tonnen in der Emulsion polymerisierte „Igelit PCU“ gab es zunächst gar keine Verarbeitungsmöglichkeit. Dem als weißes Pulver anfallenden Polyvinylchlorid war mit den damals bekannten Verarbeitungsmöglichkeiten von Gummi und Celluloid nicht recht beizukommen. Der erste Erfolg gelang über die chemische Nachbehandlung durch Nachchlorierung in Rheinfelden 1934.

Das nachchlorierte PVC war relativ leicht löslich und konnte als Lackrohstoff und zur Herstellung von dünnen Gießfolien eingesetzt werden. Dieser Umweg über die Nachchlorierung führte schließlich zur Herstellung der ersten vollsynthetischen Fasern und damit zum ersten Schritt auf dem Weg zum inzwischen vielseitigen Einsatz dieses Werkstoffes.

In Bitterfeld wurden auch Anstrengungen zur Verarbeitung des anfallenden normalen Igelit PCU-Pulvers unternommen. In dieser Zeit um 1930 war das Celluloid der einzige bekannte Thermoplast. Dieser ließ sich schon bei Temperaturen von 90°C bis 100°C durch Walzen und Pressen verformen. In diesem Temperaturbereich blieben entsprechende Versuche mit Igelit PCU auf den vorhandenen Maschinen jedoch ohne Erfolg.

Wegen der Befürchtung der Zersetzung des Polyvinylchlorids bei Temperaturen über 100°C wurden die Verarbeitungstemperaturen nur zögerlich erhöht. In der gleichen Weise wurde die Verarbeitungsdrücke vorsichtig gesteigert, was erst mit der Konstruktion neuer Mischwalzwerke und Pressen möglich war und wiederum Zeit beanspruchte.

Der Durchbruch gelang den Technikern in Bitterfeld, als ihnen bei Temperaturen von 160°C bis 165°C die Plastifizierung des PVC-U gelang, ohne daß die befürchtete Zersetzung eintrat. Damit war 1935 die Voraussetzung für den großtechnischen Einsatz von PVC-U geschaffen, obwohl zunächst nur die Vorstufe zu einer Weiterverarbeitung des Rohstoffes erreicht war.

Dem kam entgegen, daß 1935 auch in Bitterfeld die Polymerisation aufgenommen wurde. Der Ausstoß von Igelit PCU-Pulver wurde zunächst langsam auf 2686 t im Jahre 1939 und schließlich auf 9202 t im Jahre 1941 gesteigert.

Auch die Weiterverarbeitung der plastifizierten PVC-U-Massen wurde in Bitterfeld entwickelt. In enger Zusammenarbeit mit der Maschinenindustrie wurden aus den schon existierenden Kalandern für die Gummi-Verarbeitung und Metallrohr-Pressen, die für die Verarbeitung des Igelit PCU geeigneten Maschinen entwickelt. Bereits 1935 gelang es in Bitterfeld neben Folien und Tafeln die ersten Rohre, Stäbe und Profile aus PVC-U herzustellen.

Nach den alten Aufzeichnungen und Beschreibungen wurden dazu 20 kg Igelit PCU-Pulver mit Octadecylalkohol oder Paraffin und Polyvinyl-octadecyläther ca. 10 Minuten lang von Hand in einem offenen Kübel gemischt. Diese Mischung wurde auf ein Misch-Walzwerk gebracht und in ca. 20 bis 25 Minuten bei 160°C zu einer Puppe aus dem plastifizierten Walzfell aufgewickelt. Dieser 160°C bis 165°C heiße Wickel von etwa 180 mm Durchmesser und 500 mm Länge wurde, wiederum von Hand, in den Zylinder einer Strangpresse (EUMUCO-Presse) eingelegt, der ebenfalls auf eine Temperatur von 160°C vorgeheizt war.

Mit einer spezifischen Kraft von 150 kg bis 400 kg wurde das plastifizierte PVC-U mit dem Kolben der Presse durch eine auf 200°C bis 230°C aufgeheizte Matritze zu Rohren oder Stäben von zunächst 150 cm und schon bald 420 cm Länge gepreßt und auf einem Rollenstand an der Luft abgekühlt. Bemerkenswert ist dabei, daß schon damals die Preßrückstände

de sowie Rohre mit Fehlstellen im noch heißen Zustand mit einem Messer wieder zerschnitten und auf der Mischwalze in die nächste neue Mischung eingearbeitet wurden. Auf diese Weise konnten mit einer neuen Mischung bis zu 50 % Preßrückstände und Rohrabfälle (solange sie keine Brenner enthielten) wiederverarbeitet werden.

So wurden von 1935 bis 1941 in Bitterfeld PVC-U-Rohre von 5 mm bis 120 mm Außendurchmesser unter der Bezeichnung „Igelit“ und „Vinidur“ hergestellt. 1941 wurden die Rohrdurchmesser auf 160 mm erweitert. Nachdem die 1935 in Bitterfeld entwickelte Verarbeitungstechnik auch von den Werken Troisdorf („Mipolam“ und „Trovidur“) und Eilenburg („Decelith“) übernommen wurde, betrug Ende 1941 die Kapazität der PVC-U-Rohrherzeugung dieser drei Produktionsstätten bereits 480 bis 600 t/a bei Herstellungskosten von 101,45 RM pro 100 kg.

Die nicht eingefärbten hell- bis dunkelbraunen Rohre wurden natürlich sofort untersucht, um ihre Eigenschaftswerte zu ermitteln. Sie unterlagen zunächst einer regelmäßigen Prüfung ihrer Dichte, Zugfestigkeit, Reißdehnung sowie einer sogenannten „Zangenprobe“ zur Beurteilung ihrer Zähigkeit und werden in einer Produktbeschreibung wie folgt charakterisiert:

„PVC-U-Rohre haben ein spezifisches Gewicht von 1,4 g/cm³; einen Erweichungspunkt von 80°C bis 85°C, eine Zugfestigkeit von ca. 500 kg/cm² und eine Dehnung von 15 bis 20%. Das Material ist physiologisch einwandfrei, säure- und laugenbeständig, sowie beständig gegen Salzlösungen, Alkohole und Benzin. Es ist schwerentflammbar, ein guter elektrischer Isolator und ein schlechter Wärmeleiter.“

Die in Bitterfeld hergestellten PVC-U-Rohre gelangten praktisch sofort zum Einsatz. Die ersten PVC-U-Druckrohre wurden 1935 in Bitterfeld und Salzgitter verlegt. In den Werken der chemischen Industrie ist der Einsatz ab 1936 belegt. Die Anwendungsgebiete waren jedoch nicht auf Industrie-Rohrleitungen zur Förderung korrosiver Medien beschränkt, sondern bewußt breit angelegt, so daß die Rohre auch sehr bald in der Hauswasserinstallation sowie bei der Lebensmittelindustrie, in Brauereien und Schankanlagen, wo sie wegen ihrer physiologischen Unbedenklichkeit, der sehr geringen Inkrustation und, bei transparenter Ausführung, einfachen visuellen Sauberheitskontrollen einen begehrten Einsatz fanden [1]. Unter anderem wurden diese in Bitterfeld produzierten Rohre 1938 für den Bau der Trinkwasserleitung in Steinfurth bei Wolfen verwendet; dort sind sie bis heute im Einsatz.

Die Anwendung der PVC-U-Erzeugnisse aus Igelit PCU in der Praxis wurde durch umfangreiche Laboruntersuchungen unterstützt. Insbesondere Buchmann [2] und Krannich [3] ermittelten alle für den Einsatz von PVC-U relevanten Eigenschaftswerte bis hin zum Zeitstandverhalten, dem Widerstand gegen Chemikalieneinwirkung und der Schweißneigung. So konnte sehr schnell geklärt werden, daß die bei den ersten Igelit-Rohren auftretende „Linsenbildung“ in der Soda-Stabilisierung des für die Rohrerstellung eingesetzten Igelit PCU Typ R begründet war. Durch die Umstellung

mensionen und die Belastbarkeit von PVC-U-Rohren in 3 Rohrreihen für Spannungen von 0,5 kg/cm²; 2,5 kg/cm² und 6 kg/cm² bei 40°C festgelegt worden sind [4 und 5].

Auch der nächste Entwicklungsschritt bei der Fertigung von Rohren aus PVC-U ging von Bitterfeld aus. Hier begann 1942 die Entwicklung von Extrudern zur kontinuierlichen Produktion von Rohren. So würden in Bitterfeld nicht nur die ersten PVC-U-Rohre überhaupt hergestellt, sondern darüber hinaus auch die Voraussetzung zu einem wirtschaftlichen, großtechnischen Verarbeitungsverfahren, dem Extrusionsprozeß, geschaffen.

Bitterfeld galt zusammen mit einer ähnlich großen Anlage von ca. 7000 t/a in Schkopau bis zum Kriegsende 1945 auch als weltweit größter PVC-U-Hersteller. Durch die Nachkriegsentwicklung blieb die PVC-U-Erzeugung und Rohrproduktion hinter den in USA und Westeuropa aufgebauten Kapazitäten zurück. In den Jahren 1965 bis 1967 konnte mit der In-

misch-geographisch günstigen Standorten ging damit einher. Der Bedarf an Soda, Schwefelsäure, Chlor und anderen Chemikalien führte zum Entstehen der Chemischen Industrie.

Für die Wahl der Bitterfelder Region als Chemiestandort war neben anderen überzeugenden Voraussetzungen vor allem die Möglichkeit der billigen Energiegewinnung durch die großen Braunkohlevorkommen ausschlaggebend. Bereits 1893 fielen die für Bitterfeld bedeutsamen Entscheidungen.

Unabhängig voneinander sprachen sich die „Elektrochemischen Werke GmbH zu Berlin“ und die „Chemische Fabrik Elektron AG, Frankfurt/M.“ für Bitterfeld als Investitionsstandort aus. Ein halbes Jahr später beschloß ein weiteres Unternehmen, die „Actien-Gesellschaft für Anilinfabrikation zu Berlin“ den Bau der Wolfener Farbenfabriken, die sich zunächst „Greppiner Farbenfabrik der Agfa“,

ges war in Bitterfeld insbesondere auch durch die stetige Weiterentwicklung der Kunststoffe gekennzeichnet.

1936 wurde eine Versuchsanlage zur Herstellung von PVC nach dem Emulsionspolymerisationsverfahren mit einer Kapazität von 600 t/a gebaut und ein dazugehöriges Prüflabor errichtet. Historisch betrachtet ist das eine der ersten nachgewiesenen größeren Anlagen zur Produktion von PVC.

1938 wurde der Aufbau einer Polymerisationsanlage mit diskontinuierlicher Fahrweise begonnen. Diese bot die Möglichkeit, Spezialtypen für verschiedene Einsatzgebiete – PVC-U und PVC-P (P=Plasticized = weichmacherhaltig; U=Unplasticized = weichmacherfrei) – je nach Bedarf zu produzieren. Diese Anlage wurde in den folgenden Jahren ständig weiter zu einer Großfabrikation unter Leitung von Dr. A. Iloff ausgebaut und erreichte im Jahre 1942 eine Kapazität von 20000 t/a. Damit war die Bitterfelder Anlage in dieser Zeit eine der größten PVC-Polymerisationsanlagen der Welt. 1938 wurde zusätzlich eine Anlage zur Herstellung von PVC-Pasten errichtet.

Bis 1945 stand die Entwicklung der Anwendungstechnik von PVC im Vordergrund; dementsprechend war das Anlagenprofil ausgerichtet. Nach Beendigung des Krieges kamen die Kunststoffbetriebe zum Erliegen. Da sie als Teil der Rüstungsindustrie galten, wurden sie entsprechend dem „Potsdamer Abkommen“ in großem Umfang demontiert, wie z. B. die Polymerisationsbetriebe, der PC-Betrieb und die PVC-U-Rohrproduktionsanlagen.

Nach 1945 wurde gemeinsam mit dem Maschinenbau in Bitterfeld die 1942 begonnene Entwicklung der Rohrextrusionstechnologie über Einschnuckenextruder wieder aufgenommen, wobei PVC-Granulat zum Einsatz kam. Erst Jahre später erfolgte der Übergang zur Rohrproduktion mittels Doppelschnuckenextruder, unter Verwendung von Blendes.

1965 erfolgte die Produktionsaufnahme gemuffter, großdimensionierter PVC-U-Rohre (Rohrtyp PVC 100), unter Einsatz spritzgegossener Muffen als Übergangslösung, bis die Technologie auf wandverdickte angeformte Steckmuffen umgestellt werden konnte. Die Muffendruckrohre wurden überwiegend in der Wasserversorgung und ca. 1/3 der hergestellten Rohre in der Landwirtschaft (Melioration) eingesetzt.

1970/73 erfolgte die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung geschäumter PVC-U-Rohre sowohl über Ein- als auch über Doppelschnuckenextrusion. Diese Rohre wurden überwiegend als Abwasser- und Entlüftungsleitungen eingesetzt.

Die bei der Entwicklung gewonnenen Erfahrungen wurden auf die Herstellung von geschäumten PVC-U-Profilen und die Verarbeitung von PVC-Umlaufmaterial angewandt. Für beide Verfahren erfolgten Lizenz- und know-how-Vergaben.

Weiterhin erfolgten Entwicklungsarbeiten zur Herstellung temperaturbeständiger PVC-C-Rohre und Fittings. So wurde 1984 die Produktion von PVC-C-Fittings für das Glasrohr-PVC-C-Warmwassersystem für den Woh-

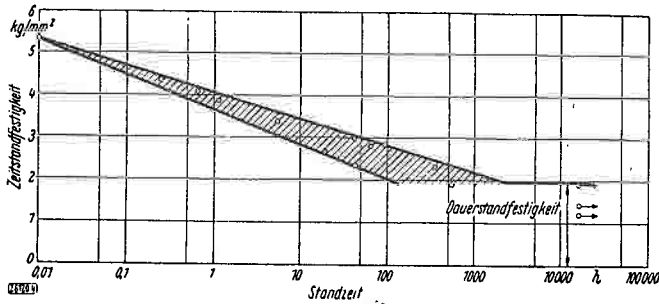


Bild 1a: Zeitstandfestigkeit und Dauerstandfestigkeit von „Vinidur“ nach Langzeitversuchen im Zeitstandversuch an Probekörpern aus Vinidur-Rohren (Abb. 18, Krannich [2d] S. 83).

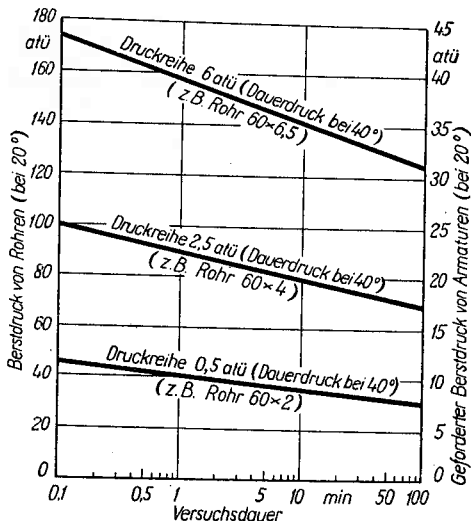


Bild 1b: Kurzzeit-Berstdruckwerte von Vinidur-Rohr (linker Maßstab) und Armaturen (rechter Maßstab) für die 3 genannten Druckreihen; Prüftemperatur 20°C (Abb. 24, Krannich [2d] S. 97)

stallation einer neuen PVC-U-Polymerisationsanlage und Extrusionsanlage mit ca. 5000 t/a und deren schrittweisen Erweiterung in den Jahren 1969 bis 1975 sowie der Einführung von S-PVC zur Rohrerzeugung in Bitterfeld wenigstens wieder der Anschluß an die weltweite Entwicklung der PVC-U-Rohrherstellung gefunden werden.

3 Der Chemiestandort Bitterfeld und das PVC-U-Rohr

Die industrielle Entwicklung in Deutschland wurde ursprünglich durch die Erfindung der Dampfmaschine (1769) und der Dynamo-Maschine (1867) initiiert; die Suche nach ökonom-

nannte. Durch diese Entscheidung entwickelte sich aus einem landwirtschaftlich genutzten Gebiet ein wichtiger Standort der chemischen Industrie.

Höhepunkt dieser Entwicklung war die Gründung der IG Farbenindustrie AG (Bild 3). Am 09. Dezember 1925 wurde der Standort Bitterfeld Teil des neu entstehenden Industriekomplexes.

Die Entstehung der I.G. Farbenindustrie AG

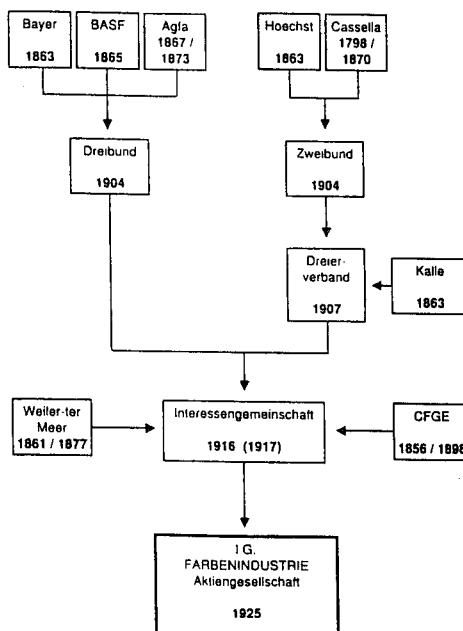


Bild 3: Schematische Darstellung der Entstehung der IG Farbenindustrie 1925.

Die Zeit nach der Gründung der IG Farbenindustrie AG bis zum Ende des zweiten Weltkrieg-

Dipl.-Ing. Reinhard E. Nowack*)
ALPHACAN Omniplast GmbH
Postfach 1256, 35627 Ehringshausen

Dipl.-Phys. Egon Barth**)
Kleiststraße 4, 53844 Troisdorf

Ing.-Oec. Ilse Otto***)
ALPHACAN Omniplast Bitterfeld GmbH
Postfach 1180, 06734 Bitterfeld

Dr. Erich W. Braun*)
ALPHACAN Omniplast GmbH
Postfach 1256, 35627 Ehringshausen

nungsbau aufgenommen. Ab 1987 wurde begonnen, die Rohrpresserei auf eine moderne computergesteuerte Misch- und Extrusions-technik umzustellen.

Im April 1992 übernahm die Firma OMNIPLAST GMBH & CO KG - heute ALPHACAN OMNIPLAST GMBH Ehringshausen - den Betrieb der „Rohrpresserei“. Mit allen 60 übernommenen Mitarbeitern wird ein optimiertes und erweitertes Rohrprogramm gefertigt.

Einen Überblick der wichtigsten bis zur Übernahme 1992 in Bitterfeld produzierten PVC-Erzeugnisse zeigt folgende Zusammenstellung aus der „Bitterfelder Chronik“ [6]:

4 Praktische Erfahrungen

Bei den weltweit ersten in Bitterfeld hergestellten PVC-U-Rohren erfolgte die Ermittlung der Qualität und Leistungsfähigkeit gleichzeitig im praktischen Einsatz und durch Laboruntersuchungen.

Schon bei der vorhergehenden Verarbeitung von PVC zu Folien und Bahnen hatte man das gute Verhalten von PVC-U gegen korrosive Angriffsmittel erkannt. Es lag also nahe, die in Bitterfeld hergestellten Rohre sofort in den angegliederten Chemiewerken einzusetzen. Bereits 1938 lagen erste Erfahrungsberichte der ab 1936 eingesetzten Rohre vor.

So berichten z. B.:

- das Ammoniakwerk Merseburg über 3900 kg Rohre:

„In erster Linie und mit guten Erfolgen wurde Igelit für die verschiedensten Säuren, Laugen und Gase (besonders Schwefelsäure und Salzsäure) angewendet.“

- die Filmfabrik Wolfen über 969 m Rohre:

„Igelitrohre werden im Anorg. Lab. Wiss. seit etwa 2 Jahren verlegt. Angreifende Stoffe: HCl jeder Konzentration, NaOH bis 20%ig, SiCl₄, NaCl-Lösung, Seewasser, destill. Wasser, Formalin, Salzsäure-Alkohol-Dämpfe. Die Rohre haben bisher in keinem Fall bezüglich ihrer chemischen Beständigkeit Anlaß zu Bestandungen gegeben.“

Das Verlegen der Rohre läßt sich infolge der leichten Bearbeitbarkeit ohne Schwierigkeiten durchführen.“

Gleichzeitig wurden in den eigenen Laboratorien und in den staatlichen Instituten umfangreiche Untersuchungen zur physiologischen Unbedenklichkeit der Rohre vorgenommen.

So urteilen:

- Der Polizeipräsident in Berlin Abteilung IV am 22. August 1938:

„Es bestehen gegen die Verwendung dieser Mipolamschläuche als beweglicher Teil der Kohlensäuredruckleitung keine Bedenken.“

- Das Institut für Gärungsgewerbe und Stärkefabrikation in Berlin am 27. Februar 1940:

„Die Berührung von etwa 40 bis 45 cm² Rohroberfläche mit ca. 330 cm³ Bier (d. i. je 1 cm² etwa 8 cm³ Bier) während 3 Wochen hat also keine Geschmacks- und Geruchsveränderung oder sonstige sichtbare Veränderungen, im besonderen keine Verschlechterung in dieser Hinsicht bewirkt. Bei beiden Fabrikationsmustern VINIDUR-ROHR MP sind in dieser Hinsicht bezüglich ihrer Eignung und Verwendung für Bier-Schankanlagen keinerlei Einwände oder Einschränkungen zu machen.“

- Das Institut für Gärungsgewerbe und Stärkefabrikation in Berlin am 31. März 1941:

Erzeugnis

PVC-Pulver	1936 - 1968	19 000
PVC-U-Folien	1938 - 1992	12 000
PVC-U-Rohre	1938 - 1992	15 000
PVC-U geschäumte Rohre (Ekazell)	1971 - 1990	3 500
PVC-Granulate	1945 - 1993	20 000
PVC-Pasten	1938 - 1968	4 000
PC-Pulver	1938 - 1993	10 500
PC-Klebelösungen und Lacke	1938 - 1992	6 000
CPE modifiziertes PVC-Granulat (Ekabon)	1983 - 1992	3 600
Strahlenchemisch chloriertes PVC (Pilotanlage)	1984 - 1990	40
PVC-Fußbodenbelag	1959 - 1990	5 Mio m ²

Produktionszeitraum

max. Produktion t/a

„Überraschenderweise liegt also in dem Vinidur-Material, das ja synthetischen, organisch-chemischen Ursprungs ist, ein Werkstoff vor, der selbst unter den angewandten, recht rigorosen Prüfbedingungen (lange Einwirkzeit, große Berührungsfläche, bezogen auf die Spirituosmenge usw.) keinerlei Beeinflussung der damit in Berührung stehenden Trinkbranntweine, Liköre und Sprit verschiedenen Verdünnungsgraden zeigt und der seinerseits von diesen Spirituosen nicht merklich verändert wird.“

Kopien der Original-Berichte liegen den Verfassern vor, siehe auch Bild 4.

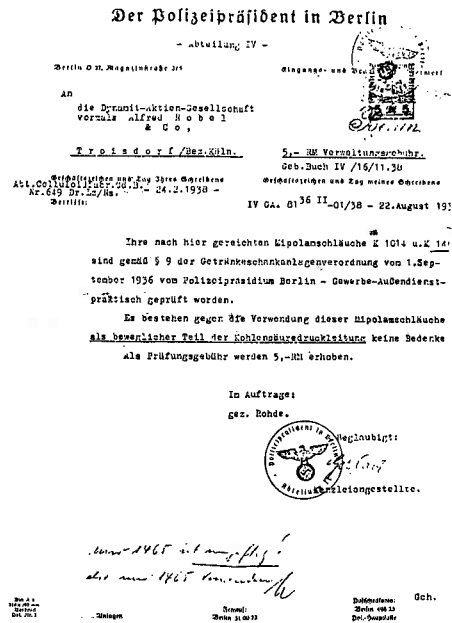


Bild 4: Unbedenklichkeitserklärung des Polizeipräsidenten in Berlin, Abteilung IV

Nachdem auch die amtlichen Bestätigungen für die physiologische Unbedenklichkeit vorlagen, fanden die Igelit-Rohre schnell in der Trinkwasserversorgung, Milchwirtschaft, Nahrungsmittelindustrie, Getränkeherstellung usw. Verwendung, da von diesen Rohren keinerlei Beeinträchtigung der geförderten Lebensmittel und Getränke zu befürchten war.

Leider wurden die systematischen Auswertungen von Erfahrungsberichten über den praktischen Einsatz der aus den ersten Produktionsjahren stammenden PVC-U-Rohre durch die Kriegs- und Nachkriegsjahre unterbrochen und wesentliche Aufzeichnungen durch die Kriegseinwirkung vernichtet.

Heute liegen umfangreiche Erfahrungen mit PVC-U-Rohren aus allen Anwendungsbereichen vor. Die anwendungsbezogene Literatur hierüber setzt aber erst mit extrudierten Rohren aus den Jahren nach 1950 ein. Untersuchungen an Rohren aus dem Fertigungszeitraum von 1935 bis 1945 gibt es nur verein-

zelt, obwohl solche Igelit-, Mipolam- und Vinidur-Rohre nachweislich bis heute im Einsatz zu finden sind.

Eine dieser seltenen Untersuchungen konnte 1961 an Mipolam-Rohren 16x1,6 mm und 22x1,6 mm durchgeführt werden. Diese Rohre wurden 1936/37 in Troisdorf ebenfalls auf einer Kolbenpresse hergestellt und 1937 in der Trinkwasserversorgung des Wohnhauses Mohr in Hamburg installiert (Bild 5) [7].

Tabelle 1: Eigenschaften von PVC-U-Rohren nach unterschiedlichen Einsatzzeiten

Proben	1	2	6
Rohr-dimensionen in mm	16x1.6	22x1.6	110x8.2
Einsatzdauer in Jahren	23	23	25
Einsatzzeit-raum	1937-1961	1937-1961	1959-1984
Einsatzort	Wohnhaus Mohr	Hamburg	IKV-Aachen Hausanschlußbleitg.
Betriebsdruck in bar	4	4	-
Durchfluß-medium	Wasser	Wasser	Wasser
Betriebstemperatur in °C	ca. 16-18	ca. 16-18	ca. 14
Werkstoff Bezeichnung	E-PVC Mipolam	E-PVC Mipolam	PVC 100 Dynadur
Bemerkungen	-	-	-
Zugfestigkeit in N/mm ²	535	475	558
Reißdehnung in %	45	14	36
Schlagzähigkeit in kJ/m ² + 23 °C ± 0 °C	10 ng	10 ng	9 ng 1 gebr
Kerbschlagzähigkeit in kJ/m ²	-	-	4.3
Wasseraufnahme Vicat	3.4	3.5	0.18
Erweichungstemperatur VST B 50 in °C	83	82	-
Innendruckversuche Standzeit in h bei σ(N/mm ²) / T(°C)	-	-	24,5 Rohrbogen
	42/20	-	-
	39/20	2	1,4
	30/20	-	-
	15/60	-	-
	14/60	3.1	-
	11/60	-	-
	10/60	203	-
	8,75 / 60	323	-
	8,55 / 60	648	-

Tabelle 2: Zusammenstellung der PVC-U-Rohre aus der Fertigung von 1935 - 1940 in Bitterfeld

Probe-Nr.	Dimension (mm)	Länge (cm)	Farbe, Aussehen, usw.
1	25 x 2,5	11,5	braun, gerade, nicht eingesetzt
2	25 x 2,8	15,0	hellbraun, gerade, nicht eingesetzt
3	40 x 3,2	15,0	hellbraun, gerade, nicht eingesetzt
4	49 x 5,5	20,0	hellbraun, gerade, nicht eingesetzt
5	20 x 2,5	56,0	grau, gerade, fleckig
6	25 x 2,9	45,0	grau, gerade, fleckig, mit Bohrloch
7	40 x 3,6	58,0	hellbraun, gerade, mit Linsen, Schlagbruch
8	40 x 3,6	35,5	hellbraun, gerade, mit Linsen, 1 Ende angeschrägt
9	40 x 5,1	33,0	rotbraun, gerade, mit grauer Muffe
10	48 x 4,6	47,0	rotbraun, gerade, 1 Ende mit Gewinde
11	32 x 3,8	50,0	rotbraun, gerade, 1 Ende mit grauem Gewindestück
12	32 x 3,8	53,0	rotbraun, gerade, 1 Ende aufgemufft
13	32 x 3,8	57,0	braun, mit Bogen und Klebemuffe
14	32 x 4,0	132	vinidurbraun, mit Bogen, aus Bitterfeld, Parkstr. 18
15	32 x 3,8	142	vinidurbraun, ausgebleicht, gerade
16	25 x 3,0	118	vinidurbraun, ausgebleicht, gerade, teilweise lackiert
17	25 x 3,0	84	vinidurbraun, ausgebleicht, gerade, teilweise lackiert
18	13 x 2,0	53	rubinrot, abgeknickt, gesplittert
19	13 x 1,6	48	rubinrot, ausgebleicht
20	13 x 1,6	39	rubinrot, ausgebleicht, mit 1 Muffe
21	13 x 1,6	39	rubinrot, ausgebleicht, mit 1 Muffe
22	25 x 3,0	160	rot, ausgebleicht, Gartenpfahl
23	Abschnitt aus Rohringmuster 160 mm, vinidurbraun, Rückhaltemuster		

Proben 1 - 13 am 16. 12. 1992 von Frau Otto in Ehringshausen übergeben.
Proben 14 - 23 am 21. 04. 1993 in Bitterfeld übernommen.

Anlässlich einer Anschlußänderung konnten 1961 aus der installierten Leitung zwei kurze Rohrabchnitte entnommen werden. Sie wurden durch Dynadur-PVC-U-Rohre ersetzt. Die restliche Installation wurde mit den damals eingebauten Rohren weiter betrieben. An diesen aus E-PVC hergestellten Mipolam-Rohren konnten die in Tabelle 1 zusammengestellten Eigenschaftswerte ermittelt werden. Besonders wertvoll sind dabei die Ergebnisse der Zeitstand-Innendruckversuche, die mit dem Rohr 16 x 1,6 mm vorgenommen wurden. Bemerkenswert ist auch, daß an diesen Rohren keine „Linsenbildungen“ festzustellen waren.

Danach konnten Zeitstand-Innendruckversuche erst wieder an einem PVC-Rohr der Fertigung 1958/59 vorgenommen werden. Auch dieses Dynadur-Rohr wurde in Troisdorf hergestellt. Es handelt sich aber um ein extrudiertes Rohr, das 1959 in der Hausanschlußleitung des IKV Aachen installiert wurde. Während sich die mechanischen Eigenschaften nur wenig von denen der Mipolam-Rohre von 1937 unterscheiden (Tab. 1), zeigt der Wert für die Wasseraufnahme, daß bei diesem Dynadur-Rohr schon S-PVC eingesetzt wurde [8]. Besonders deutlich wird die in der Zwischenzeit durch Rohstoff-, Rezeptur- und Verfahrensentwicklung erreichte Qualitätsverbesserung im Zeitstand-Innendruckverhalten erkennbar.

Bei solch wenigen, nur sporadisch anfallenden Untersuchungen an PVC-U-Rohren der ersten Generation [9, 10] mit inzwischen über 50-jähriger Praxiserfahrung ist es ein regelrechter Glücksfall, daß nach der Übernahme des Rohrpresswerkes der Chemie AG Bitterfeld durch die Omniplast GmbH & Co. KG (1992) die Tradition des ersten PVC-U-Rohrherstellers der Welt gewahrt werden konnte.

Durch die Initiative von Omniplast und die Kenntnisse der örtlichen Gegebenheiten durch die Mitarbeiter der heutigen ALPHACAN OMNIPLAST BITTERFELD GMBH ist es 1992 gelungen, eine Reihe von Igelit- und Vinidur-Rohrabchnitten zu bekommen, die in der Zeit von 1935 bis 1940 in Bitterfeld hergestellt wurden und ab 1935 im Einsatz waren.

Wenn auch die 1992 unter dem Bitterfelder Marktplatz gefundenen 6 m langen Baumstämme aus der zwischen 1562 und Mitte des

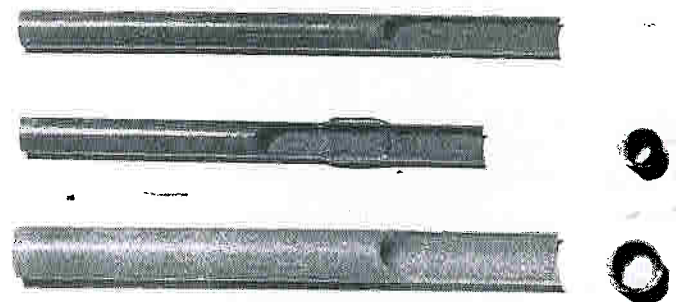
Hüls Troisdorf AG – BAS-00-820-0089 – und mit der physiologischen Untersuchung das DVGW-Technologiezentrum Wasser Karlsruhe – Prüfstelle Wasser & Korrosion – beauftragt.

Bei den in Troisdorf durchgeführten Prüfungen wurde der Schwerpunkt auf die Ermittlung des Innendruck-Zeitstandverhaltens gelegt.

Für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaftswerte wurden deshalb vorwiegend die kürzeren Teile und Rohrabchnitte benutzt, die, soweit erkennbar, zumindest teilweise nicht praktisch eingesetzt waren.



Bild 6: 1992 unter dem Marktplatz gefundenes etwa 130 Jahre altes Holzrohr aus der zwischen 1562 bis Mitte des 19. Jahrhunderts genutzten Wasserleitung von Bitterfeld.



Werkstoff: PVC (Mipolam)
Abmessung: 16,5 x 1,6 und 22,5 x 1,6
Einbaujahr: 1937
Einbauort: Hamburg
mittl. Betriebsdruck: 5 atü
Durchflußmedium: Trinkwasser

Bild 5: PVC-Rohre aus einer 1937 in einem Hamburger Wohnhaus verlegten Trinkwasserleitung nach ihrem Einsatz bis 1961 aus [7].

19. Jahrhunderts genutzten Wasserleitung aus Holzrohren (Bild 6) eine beachtliche Betriebszeit erreicht haben, ist für die Untersuchung von PVC-U-Rohren eine Einsatzdauer von 57 Jahren genauso interessant, weil diese Rohre unmittelbar nach ihrer Erfindung für die Trinkwasserversorgung eingesetzt wurden, noch teilweise bis heute in Betrieb sind und ihre Funktion zur Zufriedenheit der Betreiber erfüllen.

5 Eigenschaften der Bitterfelder PVC-U-Rohre

Wie die Übersicht in Tabelle 2 und die Bilder 7 und 8 zeigen, standen für die, dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Untersuchung keine systematisch ausgewählten, sondern nur mehr oder weniger zufällig entdeckte Rohrabchnitte zur Verfügung.

Diese unterscheiden sich in Herstellungszeitraum, Einsatzbedingungen, Dimensionen und vor allem auch in der Länge, so daß nicht an allen Rohren Zeitstand-Innendruckversuche durchgeführt werden konnten.

Mit den physikalischen Untersuchungen der Rohre wurde das von der BAM akkreditierte Prüflabor der Stoff- und Systemprüfung der



Bild 7: Die für die Untersuchung zur Verfügung stehenden Rohrabchnitte 1 - 13.



Bild 8: Die für die Untersuchung zur Verfügung stehenden Rohrabchnitte 14 - 22.



Bild 9: Innenoberfläche des Vinidur-Rohres Nr. 24 nach über 50jährigem Einsatz ohne Inkrustationen und Ablagerungen.

Bereits bei der Beurteilung der äußeren und der inneren Rohroberfläche, der Bestimmung der Durchmesser und Wanddicken und der Vorbereitung der Prüfkörper war augenfällig, daß in den eingesetzten Rohren selbst nach mehr als 50-jähriger Benutzung praktisch keine Inkrustationen eingetreten sind. An den Innenoberflächen dieser Rohre konnten keine Veränderungen festgestellt werden. Sie sind nahezu so glatt wie zu Beginn des Einsatzes vor mehr als 50 Jahren und der Rohrquerschnitt ist nicht eingeschränkt (Bild 9).

Über die Bestimmung der Wasseraufnahme nach DIN 8061 und der Dehydrochlorierungszeit nach DIN 53381 Teil 1 sollten erste Unterschiede der eingesetzten PVC-Typen und der Rezepturen ermittelt werden.

Zur besseren Beurteilung der gemessenen Werte an den alten Bitterfelder Rohren sind in den folgenden Tabellen jeweils die für PVC-U-Rohre des heute üblichen Qualitätsstandes charakteristischen Werte mit aufgeführt.

Vergleicht man die in Tabelle 3 zusammengestellten Eigenschaften, so läßt sich erkennen, daß die im Zugversuch ermittelten Werte sich von den heute üblichen nur wenig unterscheiden und für PVC-U-Halbzeuge als normal bezeichnet werden können.

Entsprechendes gilt auch für die im Zugversuch ermittelten Elastizitätsmoduln, die nur geringfügig niedriger liegen als bei den heute üblichen Rohren.

Nicht auf dem heutigen Niveau befindet sich dagegen die Schlagzähigkeit der alten Bitterfelder Rohre. Im Hinblick auf die Herstellung mit der Kolbenpresse ist das aber auch nicht zu erwarten.

Die Plastifizierung der Rohre ist überraschend gut (Bild 10). Zwar sind in vielen der angefertigten Mikrotomschnitte Lunker (Bild 11) und mehr oder weniger große Risse erkennbar (Bild 12), aber bei der mikroskopischen Beurteilung konnten keine nichtaufgeschlossenen PVC-Teilchen entdeckt werden.

Gegenüber der Schlagzähigkeit nach Charpy erreichen die Rohre eine recht günstige Kerbschlagzähigkeit. Dies deutet mit den Werten des Elastizitätsmoduls schon an, daß die untersuchten Rohre aus E-PVC hergestellt wurden.

Die Vicat-Erweichungstemperaturen von 79°C bis 82°C sind als durchaus gute Werte zu bezeichnen und zeigen, daß nahezu reines PVC-U eingesetzt wurde. Zusatzstoffe, wie z. B. die zum Ziehen der Rohre erforderlichen Gleitmittel sind nur in geringen Mengen verwendet worden.

Die nach DIN 8061 durch 24-stündiges Lagern in kochendem Wasser ermittelten Massenzunahmen bestätigen, daß die untersuchten Rohre ausschließlich aus E-PVC hergestellt worden sind (Tabelle 4).

Tabelle 3: Eigenschaftswerte von PVC-U-Rohren aus der Fertigung von 1935-1940 in Bitterfeld

Eigen-schaft	Dimen-sion	Prüf-meth.	2	3	4	6	14	11	12	13	Omniplast-Rohre Fertigung 1993
Streckspannung	N/mm ²	53455		56,3 (48,9-63,7)	51,8 (51,7-52,0)						55-70
Streckdehnung	%			3,45 (3,4-3,5)	3,7 (3,7-3,7)						8-20
Reißfestigkeit	N/mm ²			39,8 (37,6-41,9)	38,3 (37,7-38,8)						
Reißdehnung	%			18,7 (18,0-19,4)	14,3 (12,7-15,9)						20-40
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	53453	5 ng/1 g		45,5 / 1 ng (38,4-58,3)		8 ng/2g		59 / 2 ng (31-103)		ohne Bruch
Kerbschlag-zähigkeit	kJ/m ²	53453			5,6 (2,8-17,4)	5,7 (4,2-10,3)	6,2 (5,4-7,4)	4,1 (3,7-4,6)			3-4
Elastizitäts-modul	N/mm ²	53457 Zugver.		2788 (2748-2866)	2843 (2787-2898)						3050 (2800-3300)
Vicat Temperatur	K	53460 B/50	353 (353-353)		355 (355-355)					352 (352-353)	356
	°C		80 (80-80)		82 (82-82)					79 (79-80)	83
Dichte	g/cm ³									1,385	1,39-1,90

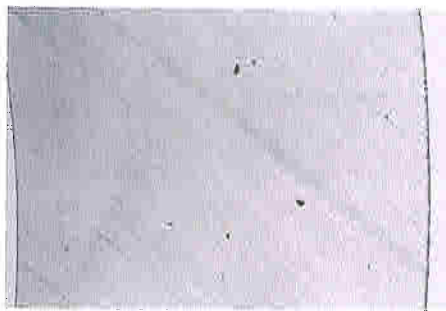


Bild 10: Querschnitt durch die Rohrwand der Probe-Nr. 14 (32 x 4,0 mm) Durchlicht aus Mikrotomschnitt, Vergr. 30 : 1.



Bild 11: Querschnitt durch die Rohrwand der Probe Nr. 15 mit Rissen parallel zu den Oberflächen und geschädigter Außenoberfläche. Durchlicht aus Mikrotomschnitt, Vergr. 25 : 1.

Tabelle 4: Wasseraufnahme von PVC-U-Rohren aus der Fertigung von 1935-1940 in Bitterfeld

Rohr-Probe	Masseverlust nach 105 h bei 40°C		Massezunahme nach 24 h Lagerung in kochendem H ₂ O		
	mg	%	mg	%	mg/cm ²
6	— 4	— 0,07	44 (438-450)	7,6 (7,5-7,7)	
7	— 21,5	— 0,781	749 (733-765)	6,3 (6,1-6,4)	
14			581 (534-628)	5,5 (5,2-5,8)	12,0 (11,6-12,4)
18			23,5 (23,0-24,0)	0,97 (0,95-0,98)	1,21 (1,18-1,24)
19			164 (135-193)	9,3 (7,6-11,0)	7,97 (6,75-9,18)
Omniplast Rohr 1993					



Bild 12: Größerer Riß in der Rohrwand der Probe Nr. 7. Durchlicht aus Mikrotomschnitt, Vergr. 40 : 1.

Die thermische Reststabilität der alten PVC-U-Rohre war von besonderem Interesse. Da nach allem, was über die damals eingesetzten Rezepturen bekannt ist, mehr oder weniger reines PVC-U ohne wesentliche Stabilisierung gegen thermischen Abbau eingesetzt wurde, entsprechen die nach DIN 53 381 Teil 1 bei 200°C ermittelten kurzen Stabilitätszeiten den Erwartungen (Tabelle 5).

Um Rückschlüsse auf das Langzeitverhalten der Rohre zu unterstützen, wurden die Stabilitätszeiten an den Rohren 13 und 14.3 sowohl im Anlieferungszustand als auch nach der Innendruck-Zeitstand-Belastung über etwa 1000 h bei 60°C ermittelt. An den praktisch unveränderten Werten ist zu erkennen, daß durch die Einwirkung des 60°C heißen Wasserbades, in dem die Zeitstand-Innendruckversuche durchgeführt wurden, jedenfalls kein weiterer thermischer Abbau eingetreten ist (die nach der Prüfung höheren Werte dürften auf Streuungen infolge der unterschiedlichen thermischen Belastung der Rohrwand während des Preßvorganges zurückzuführen sein). Danach dürfte die thermische Alterung bei einem Einsatz solcher Rohre für den Transport von Frisch- bzw. Abwasser bei den dann üblichen Temperaturen von 8°C bis 45°C von untergeordneter Bedeutung sein, obwohl die erreichten Stabilitätszeiten deutlich niedriger sind als bei heutigen PVC-U-Rohren.

Bei der Bewertung der in Tabelle 6 aufgeführten Ergebnisse der Zeitstand-Innendruckversuche bei 60°C sind folgende von der heute gültigen DIN 8061 abweichende Versuchsbedingungen zu berücksichtigen:

Tabelle 5: Dehydrochlorierungszeit (min) von PVC-U-Rohren aus der Fertigung von 1935 – 1940 in Bitterfeld

Rohrprobe	Dehydrochlorierungszeit (min)
23 (Anlieferung)	9
13 (Anlieferung)	9
13 (nach 1063 h bei 60 °C)	10
14 (Anlieferung)	7,5
14 (nach 961,3 h bei 60 °C)	11
18 (Anlieferung)	22
20 (Anlieferung)	6
Omnoplast-Rohr, Fertigung 1993	41

Die Länge der Prüfkörper entspricht nicht immer der nach DIN 8061 Punkt 4.3 geforderten Prüfkörperlänge. Außerdem wurden nicht nur glatte gerade Rohrabchnitte, sondern auch solche mit Muffenverbindungen und zu Bogen verformte Prüfkörper eingesetzt.

Von den insgesamt 17 Proben brachen 15 innerhalb einer Belastungszeit von 1000 h mit Prüfspannungen von 5 N/mm² bis 13 N/mm². Zwei Rohrproben erreichten Standzeiten über 1000 h; sie brachen nach 5640 h bzw. 16608 h. Trägt man die Bruchzeiten als Funktion der Prüfspannung in ein übliches Zeitstanddiagramm ein (Bild 13), ist zu erkennen, daß diese bei etwa gleicher Prüfspannung maximal über 3 Dekaden streuen. Das ist bei der unterschiedlichen Vorgeschichte der verschiedenen Rohre eine erstaunlich geringe Streuung. Bei FNK-Rundversuchen an Rohren einer Charge der Fertigung 1966 traten ebenfalls Streuungen bis zu 3 Dekaden auf.

Das Resultat der Zeitstand-Innendruckversuche läßt es deshalb zu, die Ergebnisse der Prüfung aller Einzelrohre zusammengefaßt zu bewerten, obwohl die Qualität der einzelnen Rohre sicher Unterschiede aufweist, z. B. wegen der diskontinuierlichen Herstellung auf der Kolbenpresse, den unterschiedlichen Fertigungszeiten, damit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und Einsatzbedingungen. Ausgenommen werden bei der Beurteilung aber doch die Rohre 19 und 20, die sicher nach 1959 hergestellt wurden, eine rubinrote Einfärbung besitzen und als Gartenpfähle einen nicht bestimmungsgemäßen Einsatz fanden.

6 Hygienische und physiologische Eigenschaften

Zur Überprüfung der physiologischen Eigenschaften wurden dem DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe die Rohre Nr. 16 und 17 übergeben.

Wie aus dem Untersuchungsbericht vom 10. März 1995 hervorgeht, entsprechen die Proben in ihrem Extraktionsverhalten den heute noch üblichen PVC-U-Werten.

Der Untersuchungsbericht wird im Original nachfolgend aufgeführt. Bild 14 zeigt die fotografische Dokumentation, die im Untersuchungsbericht aufgeführt ist (s. Seite 9):

7 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

7.1 Ovalität

Bei den meisten der untersuchten Rohre sind starke Unterschiede in der Umfangverteilung der Wanddicken, sowie deutliche Ovalitäten vorhanden (Bild 15). Dies ist verständlich, wenn man bedenkt, daß die Rohrwerkzeuge direkt in das Kopfende des Stoffzylinders eingeschraubt wurden. Die Werkzeuge bestanden aus einer einfachen Lochplatte oder einer Hülse und einem in diese mit einem Verteilerstück eingesetzten Stift als Dorn. Die Zentrierung des Stiftes erfolgte durch 3 Stellschrauben zu Beginn des Preßvorganges. Während dieses Anfahrvorganges wurde der Kolben-

Rundheit, Geradheit und Dimensionsgenauigkeit nicht mit Rohren aus der heute als Stand der Technik geltenden Extrusionstechnik, des Werkzeugbaues, der Kalibrier- und Kühlftechnik konkurrieren können (Bild 16). Umso bemerkenswerter ist aber, daß trotz der genannten Mängel noch heute nach 57 Jahren Einsatzzeit ein gutes Zeitstandverhalten erzielt wird und nachgewiesen werden kann.

7.2 Beurteilung der Rohrqualität

Legt man für die Beurteilung der untersuchten Igelit- und Vinidur-Rohre die Erstaussagen der

Tabelle 6: Zeitstand-Innendruckverhalten von PVC-U-Rohren bei 60 °C (iW/aW) der Fertigung 1935 - 1940 in Bitterfeld

Rohr-Nr.	Dimension (mm)	Prüfkörperlänge (freie Länge)	Probekörper	Prüfspannung (N/mm ²)	Prüfdruck (bar)	Standzeit (h)	Bemerkung
5.1	20 x 2,5	197	glattes Rohr	13,06	36,0	6,21	Sprödbbruch (kleiner Riß)
5.2	20 x 2,5	207	glattes Rohr	10,00	27,2	32,6	Sprödbbruch
6	25 x 3,0	195	glattes Rohr	5,84	15,0	138,0	Sprödbbruch
8	40 x 3,6	260	glattes Rohr mit Linsen	5,04	10,0	521,5	weeping
9	40 x 5,1	220	Rohr mit Muffe	8,01	15,0	383,0	Sprödbbruch
10	48 x 4,6	335	glattes Rohr	7,72	16,0	477,0	Sprödbbruch
11	32 x 3,8	295	glattes Rohr	7,83	20,0	203,6	Sprödbbruch
12	32 x 3,8	345	glattes Rohr	5,98	16,3	16608,0	Sprödbbruch
13	32 x 3,8	455	Rohr mit Bogen und Muffe	5,00	13,0	1063,0	Sprödbbruch
14.1	32 x 3,7	295	glattes Rohr	6,94	18,0	562,6	Sprödbbruch
14.2	32 x 3,7	210	glattes Rohr	6,14	16,0	624,5	Sprödbbruch
14.3	32 x 3,7	210	glattes Rohr	5,06	13,0	961,3	Sprödbbruch
15.1	32 x 3,6	170	glattes Rohr	6,96	18,0	163,2	Sprödbbruch
15.2	32 x 3,6	210	glattes Rohr	6,06	16,0	0	Bruch bei 15 bar
15.3	32 x 3,6	170	glattes Rohr	5,06	13,0	425,5	Sprödbbruch
19	13 x 1,5	210	glattes Rohr	5,86	15,0	5640,0	Sprödbbruch
20	13 x 1,5	210	glattes Rohr	6,13	16,0	170,0	Riß an Einsp.

Zeitstandinnendruckverhalten von PVC-U-Rohren der Fertigung 1935 bis 1940 in Bitterfeld bei +60 °C (iW/aW) + DIN 8061-Kurve; Rohre: 5 - 20

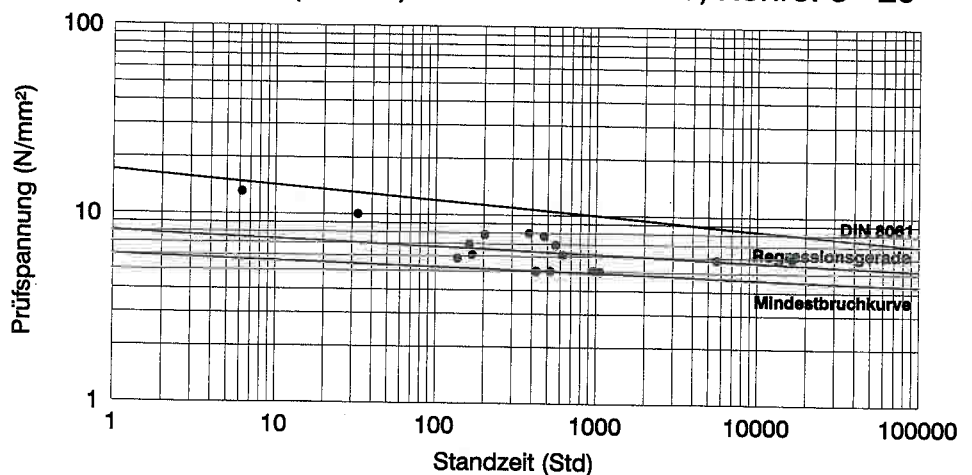


Bild 13: Zeitstand-Diagramm aus den bei Zeitstand-Innendruckversuchen bei 60 °C ermittelten Bruchzeiten der Bitterfelder Rohre Nr. 5-20 in Abhängigkeit von den Prüfspannungen.

druck reduziert, so daß die Austrittsgeschwindigkeit der plastifizierten Masse aus dem Mundstück gering war. Als Maß für die Zentrierung des Innenstiftes während des Anfahrens diente die Krümmung des austretenden Rohres. Etwa zentrische Einstellung war erreicht, wenn die Krümmung gegen Null ging und das Rohr in der Achse des Stoffzylinders aus dem Mundstück austrat. Es ist klar, daß unter solchen Bedingungen hergestellte Rohre in ihrer

DIN 8061 und 8062 vom Juli 1941 zugrunde, sieht man, daß die Zugfestigkeit von 54,05 N/mm² (49,0 bis 63,7) N/mm² und der Elastizitätsmodul von 2815 N/mm² (2748 bis 2898) N/mm² nur geringfügig hinter den in dieser DIN genannten mittleren physikalischen Eigenschaftswerten von etwa 55 N/mm² bzw. 3000 N/mm² zurückbleiben.

Die gemessenen Vicat-Erweichungstemperaturen von 80 °C (79 bis 82) °C entsprechen dem in der DIN 8061 genannten Wert von etwa 80 °C exakt.

Untersuchungsbericht zur Prüfung von PVC-hart-Rohren auf hygienische Unbedenklichkeit nach KTW-Empfehlungen

Probenmaterial: PVC-u-Rohre a) außen rotbraun, innen gelbbraun
b) außen hellbraun, innen rotbraun

Hersteller: Chemische Werke Bitterfeld

Herstelljahr: Zwischen 1935 und 1940 (Kolbenpreßverfahren)

Eingereicht durch: Alphacan Omniplast, Bitterfeld & Ehringshausen

Eingang: März 1994

A) Probenvorbereitung

Probekörper a) wurde außen vorgereinigt und nach Ablängen nach KTW-Standard der Vorbehandlung (24 h Stagnation, 2 h Spülen mit Leitungswasser) unterzogen

Probekörper b) mußten vor der standardmäßigen Vorbehandlung im Innern der Rohre von dort noch vorhandenen (Erdboden-)Verstopfungen befreit werden.

Das Technologiezentrum Wasser ist eine Einrichtung des DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Prof. Dr.-Ing. W. Kühn

Postfach 6980
76128 Karlsruhe
Telefon: 0721-93163-0
Telefax: 0721-33160

Baden-Württembergische Bank Karlsruhe
BLZ 660 200 20
Konto 403 386 18 00
Ust-ID DE 114341970

Bild 14: Fotografische Dokumentation zum Untersuchungsbericht des DVGW-TZW Karlsruhe (siehe auch Seite 14)



Bild 15: Querschnitt von 2 Vinidur-Rohringen aus Bitterfeld mit deutlicher Unrundheit und Wanddickenschwankungen.

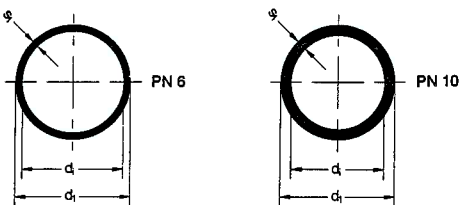


Bild 16: Querschnitt eines Omniplast-Rohres der Fertigung 1994.

Die Rohrdurchmesser entsprechen naturgemäß den in DIN 8062 genannten Werten nicht so genau, da bis auf die Rohre 18 bis 22 alle anderen Rohre als Vorläufer dieser Norm zu betrachten sind. Das gleiche gilt auch für die

B) Untersuchungsergebnisse

1 Werkstoff

Beide Proben nicht bleistabilisiert, mögliches vorhandenes Stabilisatorsystem auf Basis Calcium.

Gehalt an monomeren VC: <0,1 mg VC/kg Rohrprobe

2. Wäßrige Extrakte

Bemerkungen 0:V-Verhältnis 1:1 cm³/cm³

Probe a)

	1. - 3. Tag	4. - 6. Tag	7. - 9. Tag	Richtw. f. 3. Extraktion
Klarheit, Färbung, Geruch, Geschmack, Schaumbildung	GS 4 verfremdet	GS 2 verfremdet	nicht nennenswert beeinflusst	nicht nennenswert beeinflusst
C-Abgabe [mgC/m ² d]	0,2	0,2	< 0,2	≤ 2,5
Cl ₂ -Zehrung [mg Cl ₂ /m ² d]	1,5	1	0,8	≤ 2,0

Probe b)

	1. - 3. Tag	4. - 6. Tag	7. - 9. Tag	Richtw. f. 3. Extraktion
Klarheit, Färbung, Geruch, Geschmack, Schaumbildung	GS 4 süßlicher	GS 2 Geruch	nicht nennenswert beeinflusst	nicht nennenswert beeinflusst
C-Abgabe [mgC/m ² d]	0,7	0,4	0,2	≤ 2,5
Cl ₂ -Zehrung [mg Cl ₂ /m ² d]	> 1,5	> 1,5	> 1,5	≤ 2,0

Beurteilung: Die Proben entsprechen in ihrem Extraktionsverhalten den heute noch üblichen PVC-u-Werten.

Die höheren Chlorzehrungswerte bei Probe b) sind wahrscheinlich auf die, durch die Reinigung erforderlichen, Beanspruchungen der Innenoberflächen zurückzuführen. Eine Prüfung der Innen- und Außenoberflächen gemeinsam erfolgte nicht, da diese sich bereits optisch deutlich unterschieden.

Der Rohrwerkstoff enthielt bei beiden Proben nur Calcium und in geringem Umfang Kalium, wahrscheinlich aus einem Stabilisatorsystem. Erwartungsgemäß lag (schon wegen der langen Auslagerungszeit) der Gehalt an monomeren VC im Werkstoff unter der analytischen Nachweisgrenze von 0,1 mg VC/kg Werkstoff.

Im übrigen waren außer der für die heutigen Verhältnisse etwas ungewöhnlichen Einfärbung des Materials keine Besonderheiten festzustellen. Es wird auf die anliegende fotografische Dokumentation Bezug genommen.

Karlsruhe, den 10. März 1995

TZW Karlsruhe
PRÜFSTELLE WASSER

Dr. I. Wagner

nach dem damaligen Stand der Technik zulässig waren und bis zu einer Temperatur von 40°C und Innendrücken bis zu 2,5 kp/cm² (Reihe 2) bzw. 6 kp/cm² (Reihe 3) eingesetzt werden konnten. Legt man diese Anforderungen der DIN 8061 und 8062, aus dem Jahre 1941 zugrunde, ist eine erste Basis für die Beurteilung der Qualität der untersuchten Rohre gefunden.

Unter Berücksichtigung der Temperaturab-



Bild 17: Noch vorhandenes PVC-U-Rohr in Bitterfeld, Parkstraße 18, aus der bis 1991 betriebenen und dann ersetzten Installation.

hängigkeit der Alterung kann aus den Ergebnissen der Zeitstand-Innendruckversuche (Tabelle 6 und Bild 13) geschlossen werden, daß die Rohre bereits den späteren Anforderungen der DIN 8061 (1941) entsprachen. Dabei wird die für die Rohre der Reihe 2 bei 40 °C zulässige Wandspannung von 2,5 kg/cm² selbst bei 60 °C sicher ertragen (Sicherheitsfaktor etwa 2). Die mit ihren Rohrabmessungen der Rohrreihe 3 entsprechenden Rohrproben ertragen die zulässige Wandspannung von 6 kg/cm² bei 60 °C nur noch eine begrenzte Zeit. Übertragen auf 40 °C entspricht aber auch das Zeitstandverhalten dieser Rohre mit Sicherheit den ersten Anforderungen der DIN 8061 (1941).

7.3 Lebensdauererwartung

Zur Abschätzung der Lebenserwartung der ersten PVC-U-Rohre kann vor allem das Ergebnis der Zeitstand-Innendruckversuche herangezogen werden. Die graphische Darstellung (Bild 13) zeigt, daß die Bruchzeiten bei 60 °C alle unter den heute nach DIN 8061 (1994) gültigen Mindestwerten liegen.

Sowohl die aus den Bruchzeiten ermittelte Regressionsgerade als auch eine graphisch konstruierte Mindestbruchkurve führen im Untersuchungszeitraum zu linearen Bruchkurven $\lg t = (a-b) \lg \sigma$, deren Neigung sogar etwas geringer ist als die der Mindestbruchkurve nach DIN 8061 (1994). Die Extrapolation dieser beiden Bruchkurven liefert für Belastungszeiten von 10⁵ h Bruchspannungen von etwa 5 N/mm² bzw. 4 N/mm².

Verlängert man die Kurven bis zu 10⁶ h, d. h. auf etwa 114 Jahre, ergeben sich Mindestbruchspannungen von etwa 3,5 N/mm² bzw. 4,5 N/mm². Das bedeutet, daß das untersuchte Rohr Nr. 14 mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 einem Innendruck von 11 bar voraussichtlich selbst bei 40 °C noch mehr als 100 Jahre lang widerstehen könnte.

Obwohl dieses Rohr in der Parkstraße 18 in Bitterfeld spätestens im Jahre 1938 installiert wurde und dort bis zu seiner Demontage im Jahre 1991, also mindestens 53 Jahre lang, zur Trinkwasserversorgung des Hauses diente (Bild 17), kann die Restlebensdauer dieses Rohres aus den Ergebnissen der Zeitstand-Innendruckuntersuchungen bei 60 °C mit ausreichender Sicherheit auf mindestens 50 Jahre beziffert werden. Übertragen auf die Einsatzbedingungen mit Temperaturen zwischen etwa 12 °C und 20 °C und den heute in Bitterfeld üblichen Leitungsdrücken von 4 bar bis 5 bar bedeutet dies, daß dieses Rohr seine Funktion sicher noch über weitere 100 Jahre hätte erfüllen können, ohne zu versagen.

Anfang März 1994 konnten 2 weitere Rohrabchnitte aus Bitterfeld für Untersuchungen beschafft werden. Die Rohre mit den Probenbezeichnungen 24 (32x3,8 mm) und 25 (25x2,9 mm) waren 53 Jahre in Bitterfeld in

der Parkstraße 18 als Trinkwasser-Hausinstallationsrohre bei einem Betriebsdruck zwischen 4 und 5 bar im Einsatz. Da diese Rohre mit 126 cm bzw. 142 cm eine ausreichende Länge für Zeitstand-Innendruckversuche hatten, konnten vom Rohr 24 vier und vom Rohr 25 fünf Proben vorbereitet und bei 60 °C geprüft werden.

An diesen beiden Rohren wurden die in Tab. 7 zusammengestellten Bruchzeiten ermittelt. Übertragen in ein Zeitstanddiagramm (Bild 18) liefern die mit Prüfspannungen zwischen 10 N/mm² und 5 N/mm² bei 60 °C ermittelten Standzeiten von 3,8 h bis 696 h eine Regressionsgerade, die extrapoliert auf 10⁶ h eine Grenzspannung von etwa 2,8 N/mm² erreicht. Auch dieses Ergebnis bedeutet, daß die untersuchten Vinidurrohre nach ihrem Einsatz bis 1991 einem Innendruck von etwa 7 bar selbst bei 60 °C noch 100 Jahre widerstehen würden. Überträgt man dieses Ergebnis mit Hilfe des aus Zeitstandversuchen bei unterschiedlichen Temperaturen an PVC-U-Rohren ermittelten Arrhenius-Diagrammes (Bild 19) auf Temperaturen von 40 °C bzw. 20 °C, würden sich für die entsprechende Restlebensdauer von 100 Jahren bei einem Sicherheitsfaktor von 1,5 noch ertragbare Innendrucke von 9 bar

bzw. 14 bar ergeben. Selbst wenn die heute in Bitterfeld üblichen Leitungsdrücke um den Faktor 2 auf 8 bis 10 bar erhöht würden, wäre diese Restlebensdauer als Frischwasserrohr noch mit diesem Sicherheitsfaktor erreichbar.

Damit werden durch die Untersuchung der Restlebensdauer dieser ersten PVC-U-Rohre nach über 50-jährigem Einsatz frühere Untersuchungen zur Abschätzung des Langzeitverhaltens von PVC-U-Rohren bestätigt [8-10]. Ohne die aus unterschiedlichen Untersuchungsmethoden ermittelten Lebensdauererwartungen auch nur im entferntesten auszus schöpfen und ohne den nach Prüfzeiten von mehr als 40 Jahren ermittelten linearen Verlauf der Zeitstandkennlinien für alle Zeiten als gesichert vorauszusetzen, bestätigt auch diese Untersuchung wie die vorhergehenden, das ausgezeichnete Alterungsverhalten von PVC-U-Rohren.

Selbst wenn nach sehr langen Belastungszeiten von >10⁷ h ein Abknicken der Zeitstandkennlinien mit einem steileren Absinken der Bruchspannung nicht ausgeschlossen werden kann und soll (dieser bilineare Verlauf der Zeitstandkennlinie ist für viele Werkstoffe und Lebensdauerdiagramme charakteristisch),

Tabelle 7: Zeitstand-Innendruckverhalten von PVC-U-Rohren aus Bitterfeld bei 60 °C (iW/aW)

Probe-Nr.	Rohr-Nr.	Dimension (mm)	Prüfkörperlänge	Prüfspannung (N/mm ²)	Prüfdruck (bar)	Standzeit (h)		Bemerkungen
						11.04.94	01.05.94	
1	24,1	32,5 x 3,8	28	10,0	26,3	3,8		Sprödbbruch (ca. 2 cm Längsriß)
2	24,2	32,5 x 3,8	28	8,1	21,0	84		Sprödbbruch (ca. 7 cm Längsriß)
3	24,3	32,5 x 3,8	28	6,0	15,6	> 312	419,8	Sprödbbruch (ca. 3 cm Längsriß)
4	24,4	32,5 x 3,8	28	5,0	13,0	> 312	624	Sprödbbruch (ca. 2,5 cm Längsriß)
5	25,1	25,2 x 2,9	25	9,0	23,0	27,6		Sprödbbruch (ca. 1 cm Längsriß)
6	25,2	25,2 x 2,9	25	8,2	21,0	72,2		Sprödbbruch (ca. 1 cm Längsriß)
7	25,3	25,2 x 2,9	25	7,0	18,0	11,1		Sprödbbruch (ca. 5 cm Längsriß)
8	25,4	25,2 x 2,9	25	6,1	15,6	> 312	474	Sprödbbruch (ca. 2,5 cm Längsriß)
9	25,5	25,2 x 2,9	25	5,0	13,0	> 312	696	Sprödbbruch (ca. 2 cm Längsriß)

Zeitstandinnendruckverhalten von PVC-U-Rohren der Fertigung 1935 bis 1940 in Bitterfeld bei +60 °C (iW/aW) + DIN 8061-Kurve; Rohre: 24 + 25

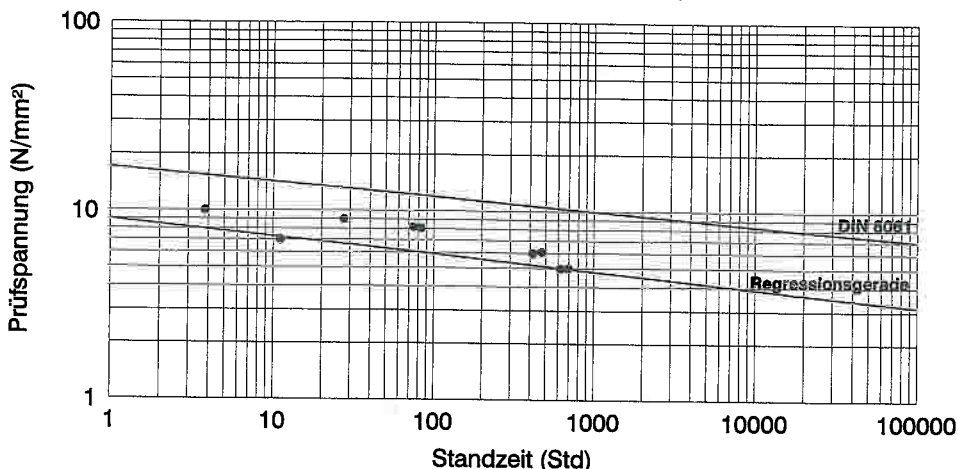


Bild 18: Zeitstand-Innendruck-Diagramm aus Innendruck-Versuchen an den Vinidur-Rohren 24 und 25 bei 60 °C.

kann auch bei den bereits über 50 Jahre alten PVC-U-Rohren bei bestimmungsgemäßem Einsatz mit einer weiteren Lebenserwartung

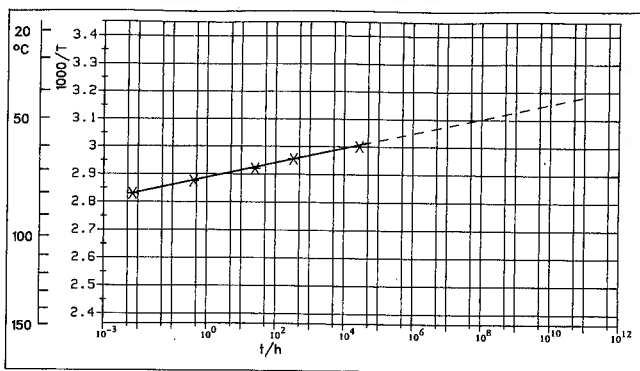
von mehr als 100 Jahren gerechnet werden, ohne daß dann die Sicherheitsgrenze der Rohre bereits erreicht wäre. Für die heutige Generation der PVC-U-Rohre gilt dies insbesondere aus der Erkenntnis, daß die Qualität und das Zeitstandverhalten der PVC-U-Rohre in den vergangenen 50 Jahren deutlich weiterentwickelt und verbessert werden konnte.

8 Der Konstruktionswerkstoff PVC-U

Die Untersuchungen der zu den ersten PVC-U-Rohren der Welt gehörenden Igelit- und Vinidur-Rohre aus Bitterfeld sind ein gutes Beispiel für die hervorragenden Eigenschaften dieses Rohrwerkstoffes.

Gerade durch den Einsatz in der Rohrleitungstechnik wird bestätigt, daß PVC-U ein vielseitiger Konstruktionswerkstoff ist. Als Thermoplast ist er relativ leicht und wirtschaftlich zu verformen. Das ermöglicht eine vielfältige Formgebung und ein entsprechend breites Anwendungsgebiet und nicht zuletzt auch, bei sortenreinem Recycling, eine sinnvolle Wiederverwertung selbst nach jahrzehntelangem Einsatz. PVC-U dient nicht nur in Form von Rohren zum sicheren Transport von Trink- und Abwasser, sondern auch von aggressiven Medien. Dabei kommt seine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Chemikalienangriff zum Tragen und hilft auch als Tafelmaterial im Apparatebau, viele Korrosionsprobleme in der Industrie sowie in der Lüftungstechnik zu vermeiden [11].

Bild 19: Arrhenius-Diagramm aus Zeitstand-Innendruckversuchen an PVC-Rohren mit 10 N/mm² bei 80 - 65 °C.



Daraus ergibt sich sofort die Frage, warum kann PVC für derartig unterschiedliche Anwendungen genutzt werden?

Die Antwort ist einfach und liegt in der an dieser Stelle aufgeführten Auflistung der wesentlichen individuellen Eigenschaften des Konstruktionswerkstoffes PVC begründet:

- PVC ist schwerentflammbar
- PVC ist korrosionsbeständig und widerstandsfähig gegen viele Chemikalien
- PVC ist ein guter Isolationswerkstoff gegen Wärme, Schall und Elektrizität
- PVC hat eine niedrige Dichte
- PVC ist bei 190 °C - 200 °C leicht verformbar
- PVC ist bei Normaltemperatur sehr formstabil ($t_g \approx 80 \text{ °C}$)
- PVC ist leicht verarbeitbar
- PVC ist leicht bearbeitbar
- PVC ist gut schweißbar
- PVC ist gut klebbar
- PVC ist einfärbbar
- PVC ist recycelbar
- PVC ist gut modifizierbar und kann durch unterschiedliche Modifizierung, Stabilisierung, Plastifizierung etc. in seinen Werkstoffeigenschaften in einem breiten Spektrum an die unterschiedlichsten Anforderungen angepaßt werden, z. B. hinsichtlich:

- = Schlagzähigkeit
- = Alterungsbeständigkeit
- = Wetterbeständigkeit
- = Temperaturbeständigkeit
- = Flexibilität
- = Steifigkeit

Damit ist eine maßgerechte Einstellung für die unterschiedlichsten Anwendungen möglich.

Außerdem gewährleisten die zulässigen Di-

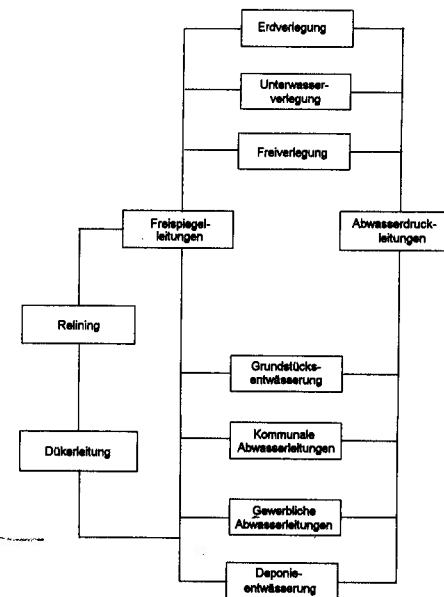


Bild 20: Einsatzbereiche von PVC-U-Rohren

mensionierungsspannungen von 10 N/mm² bis 12,5 N/mm² bei 20 °C den Einsatz von PVC-U als Konstruktionswerkstoff für langlebige Produkte. Aus den genannten Gründen und weil aus volkswirtschaftlicher Sicht das Preis-/Leistungsverhältnis optimal ist, wurde bis heute trotz vielfältiger Bemühungen keine echte Alternative zu PVC gefunden.



Ein weiteres großes Anwendungsgebiet haben PVC-U-Profile im Fensterbau gefunden. Dabei liegen die Vorzüge dieses Werkstoffes in seiner guten Wetterbeständigkeit und in seiner geringen Wärmeleitfähigkeit. Darüber hinaus ist PVC-U im gesamten Bauwesen als langlebiger Werkstoff äußerst vielseitig bei unterschiedlichsten Anwendungen im Einsatz.

Mit der nachfolgend aufgeführten Anwendungsliste werden die wichtigsten Einsatzbereiche des Konstruktionswerkstoffes PVC-U beschrieben (siehe auch Bild 20):

- Trinkwasser-Rohre und -Formstücke (innerhalb des Gebäudes)
- Trinkwasser-Rohre und -Formstücke (im Erdreich)
- Abwasser-Rohre und -Formstücke (innerhalb des Gebäudes)
- Abwasser-Rohre und -Formstücke (im Erdreich)
- Rohre und Formstücke für Lüftungsleitungen
- Fenster
- Rolläden
- Fassadenelemente
- Dachrinnen
- Regenfallrohre
- Dachbahnen
- Abdichtungsfolien
- Wellplatten
- Lichtbandprofile
- Traglufthalten
- Kabelisolierungen
- Deckenabhängungen
- Fußbodenbeläge
- Handläufe
- Profile
- medizinische Anwendungen
- chemischer Apparatebau (Tafeln)
- Schachtbauwerke

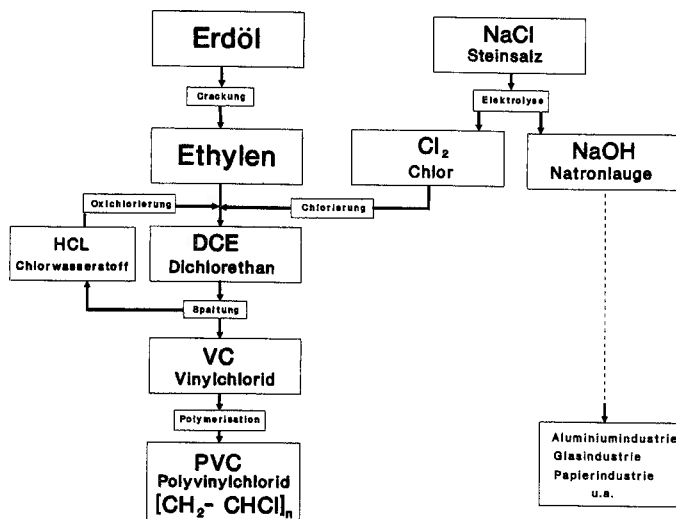


Bild 21: Schematische Darstellung der PVC-Herstellung.

9 Die ökologische Position von PVC

Polyvinylchlorid (PVC) ist **der Werkstoff** für langlebige Kunststoffanwendungen. 75 % aller Kunststoffrohre, mehr als 45 % aller Fensterahmen und nahezu alle Rolläden werden aus PVC-U hergestellt. Weitere Anwendungen im Baugewerbe sind Bodenbeläge, Strukturschaumtapeten und Dachrinnen. PVC ist das wichtigste Isolier- und Ummantelungsmaterial für den Kabelsektor. Zu den PVC-Anwendungen mit mittlerer Lebensdauer gehören Schallplatten, Kinderbälle und Schwimmflügel. Kurzlebige Gebrauchsgegenstände und Einmal-Artikel werden seltener aus PVC hergestellt. Zu dieser Kategorie gehören Scheckkarten, Diskettenhüllen und medizinische Produkte wie Blutbeutel und Dialyseschläuche. Die Verpackung hat mit rund 12 % einen relativ geringen Anteil am PVC-Verbrauch in der BRD, jedoch beherrscht PVC spezielle Teilgebiete wie die Frischfleischfolie oder die Durchdrückpackung für Medikamente.

PVC hat seine Bedeutung wie jeder andere erfolgreiche Werkstoff aufgrund technischer Eigenschaften und ökonomischer Vorteile erlangt:

Die gute Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe und der kurze, effiziente Syntheseweg ermöglichen einen günstigen Werkstoffpreis.

PVC läßt sich bei relativ niedrigen Temperaturen verarbeiten. Es erlaubt wegen seiner rheologischen Eigenschaften der Schmelze eine Vielzahl von Verarbeitungsmethoden. PVC-Halbzeuge können problemlos umgeformt, verschweißt, verklebt und bedruckt werden.

Korrosionsbeständigkeit, Licht- und Witterbeständigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen mikrobiellen Befall, die Barrierewirkung (=Diffusionssperre) und die über ein weites Spektrum variierbaren mechanischen Eigenschaften befähigen zum Einsatz besonders in anspruchsvollen Produkten.

Viele dieser Eigenschaften sowie der geringe Energiebedarf für die Herstellung, der geringe Anfall an Nebenprodukten, die Effizienz der Verarbeitung und die Langlebigkeit der Produkte setzen sich auch in ökologische Vorteile um.

9.1 Synthese und Rohstoff

Ausgangspunkt für die Herstellung von PVC ($\text{CH}_2\text{-CHCl}_n$) sind Steinsalz und Ethylen. Ethylen ist die im größten Umfang hergestellte Petrochemikalie. Es wird zusammen mit einer Reihe anderer Werkstoffe durch Pyrolyse (Cracken) von Erdöl oder Erdgas hergestellt. Dabei nutzt die PVC-Produktion die Produkte der Erdölspaltung besonders gut aus.

Um 1 t PVC herzustellen werden neben ca. 530 kg Chlor 470 kg Ethylen benötigt, für die Herstellung von 1 t Polyethylen geht man hingegen von 1015 kg Ethylen aus.

Die Rohstoffbasis für andere Kunststoffe ist weit schmaler, weil deren Vorprodukte bei der Erdölraffination in vergleichsweise kleinen Mengen anfallen und die Syntheserouten weniger effizient sind. Tab. 8 zeigt den Energie- und Erdölbedarf für die Herstellung häufig verwendeter Kunststoffe unter Berücksichtigung der Wertstoffausbeuten [14].

Die Salzlagerstätten der Bundesrepublik werden auf 100.000 km³ geschätzt [13]. Aus dem Steinsalz wird durch Elektrolyse Chlor, Natronlauge und Wasserstoff hergestellt. Chlor wird an Ethylen synthetisiert; über die Zwischenstufe 1,2-Dichlorethan entsteht Vinylchlorid. Vinylchlorid wird in geschlossenen Anlagen zu PVC polymerisiert [12] (Bild 21).

Tabelle 8: Energiebedarf, Erdöleinsatz sowie Luft- und Wasserbedarf für die Erzeugung verschiedener Standard-Kunststoffe

	Einheit	PVC	PET	PS	PS-III	PE-LD	PE-HD	PP
Ressourcen								
Energieäquivalent	MJ	51,100	84,500	75,300	76,600	68,100	67,600	71,000
Thermische Energie	MJ	38,360	74,580	71,665	72,720	59,730	62,580	65,600
Elektr. Energie	kWh	1,340	1,040	0,380	0,410	0,880	0,530	0,570
Gutschrift MVA	MJ	8,640	15,070	19,150	19,200	20,780	20,780	21,120
Erdöleinsatz	g	906,350	4.014,370	3.493,890	3.406,560	1.966,420	1.964,210	1.964,210
Nebenausbeuten	g	458,190	2.103,200	2.189,000	2.116,510	950,700	945,460	946,960
Kritische Luftmenge								
Indirekt ¹	1000 m ³	276,595	332,023	323,051	330,591	-20,663	-26,424	79,485
Prozeß-typisch ²	1000 m ³	122,553	216,678	214,625	209,820	100,757	98,958	101,429
Produktion total	1000 m ³	399,148	548,701	537,676	540,410	80,094	72,534	180,914
MVA (Schweiz)	1000 m ³	285,452	143,630	138,263	138,263	148,997	148,997	148,997
Total	1000 m ³	685,847	692,382	675,853	678,688	229,091	221,531	329,911
MVA TA-Luft ³	1000 m ³	428,462	477,693	458,586	458,586	496,801	496,801	496,801
MVA 17.BlmSchV ³	1000 m ³	120,526	195,394	187,579	187,579	203,210	203,210	203,210
Kritische Wassermenge								
Indirekt ¹	m ³	0,008	0,033	0,029	0,028	0,015	0,015	0,016
Prozeß-typisch ²	m ³	0,307	0,087	0,032	0,012	0,092	0,092	0,107
Total	m ³	0,315	0,120	0,060	0,040	0,107	0,107	0,122

1) Indirekte Prozesse: Erdölgewinnung, Erdöltransport, Stromgewinnung, Dampferzeugung etc.

2) Direkte Prozesse: Chemische Umsetzungen (Elektrolyse, Cracken, Polymerisation etc.)

3) Berechnung nach Modell BUWAL [14], jedoch mit den Grenzwerten der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft 1986) bzw. der 17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (17. BImSchV)

MVA = Müllverbrennungsanlage

9.2 Ökobilanzen

Ökobilanzen sind eine formalisierte Betrachtungsweise der Umweltauswirkungen eines Produktes. Welche Emissionen bei der Produktion von PVC entstehen zeigt Tabelle 9. Die Werte sind der Studie des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) entnommen [14]. Durch Wichtung mit Grenzwerten errechnet das BUWAL kritische Luft- und Wassermengen, ein Maß für die Belastung dieser Umweltkompartimente. Tabelle 8 vergleicht das Energieäquivalent, den Roh-

[16], ob ein Fensterrahmen seine Funktion 50 Jahre oder 20 Jahre erfüllt und ob das Produkt ein sinnvolles Recycling erlaubt oder nicht. Pflegeaufwand und Entsorgung können zusätzlich Umweltbelastungen verursachen, die mit der der Herstellung vergleichbar sind. Für alle Werkstoffalternativen muß der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden, von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Entsorgung des genutzten Produktes.

Tabelle 9: Emissionen in Luft und Wasser durch PVC-Produktion und Verbrennung in einer Müllverbrennungsanlage bezogen auf 1 kg reines PVC nach BUWAL [14]

	Wichtungsfaktor ¹ mg/m ³	Produktion Indirekt ² g	Spezifisch ³ g	Müllverbrennungsanlage		
				BUWAL g	TA-Luft 86 ⁴ g	17. BImSchV ⁴ g
Luft						
Partikel	0,0700	0,4490	0,1830	0,0130	0,2400	0,0800
CO	8,0000	0,8160	0,2470	0,3200	0,8000	0,4000
HC	15,0000	9,1470	1,3730			
N ₂ O	0,0300	0,6340	0,0000			
NO _x	0,0300	2,2420	0,7930	1,2800	4,0000	1,6000
SO ₂	0,0300	5,1800	0,7820	0,2880		
Aldehyde	0,0300	0,0040	0,0000			
Cl-Organika	0,0100	0,0000	0,1690			
Sonst. Org.	0,0100	0,0080	0,5000	0,0080	0,0160	0,0080
NH ₃	0,5000	0,0010	0,0000			
HCl	0,1000	0,0000	0,0000	23,2160	29,0000	5,8000
Cl ₂	0,0200	0,0000	0,0003			
Hg	0,0007	0,0000	0,0003			
Wasser						
Cl-Organika	0,1000	0,0000	0,0150			
Organika gelöst	10,0000	0,0000	0,5240			
Feststoff susp.	20,0000	0,0000	0,0620			
Öle	20,0000	0,1550	0,0010			
Phenole	0,0500	0,0000	0,0050			
Fluoride	10,0000	0,0020	0,0000			
Hg	0,0100	0,0000	0,0002			

1) Wichtungsfaktoren nach BUWAL zur Errechnung der kritischen Luft- und Wasservolumina.

2) Indirekte Prozesse: Erdölgewinnung, Erdöltransport, Stromgewinnung, Dampferzeugung etc.

3) Direkte Prozesse: Chemische Umsetzungen (Elektrolyse, Cracken, Polymerisation etc.)

4) Berechnung nach Modell BUWAL [14], jedoch mit den Grenzwerten der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft 1986) bzw. der 17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (17. BImSchV). Moderne Müllverbrennungsanlagen arbeiten praktisch abwasserfrei.

stoffbedarf und die kritischen Luft- bzw. Wassermengen für verschiedene Rohstoffe und Leistungen [14].

Ein direkter Vergleich dieser Umweltauswirkungen ist jedoch wenig sinnvoll. Denn es ist von grundlegender Wichtigkeit, ob eine Flasche 48 g (Flascheninhalt 1,5 l aus PVC) wiegt oder 400 g (Flascheninhalt 1 l aus Leichtglas)

Ausgehend von den Daten des Schweizer Bundesamtes ist es relativ einfach, Ökobilanzen für Einmal-Artikel zu erstellen [17]. Tabletten werden sehr häufig in einer Durchdrückpackung verkauft, die aus einer tiefgezogenen PVC-Folie mit einer dünnen Aluminiumrückwand besteht. Beim zweiten Beispiel werden Wundsekretabsaugflaschen aus PET und aus

PVC verglichen. Beide Materialien erfüllen alle Anforderungen: Sterilisierbarkeit, Transparenz und Druckfestigkeit [18]. Die zu verarbeitenden Materialmengen unterscheiden sich wenig: PVC 84 g, PET 95 g (Stationssysteme 400 ml, ohne Schlauch).

Dagegen gibt es bislang nur ein einziges Bauprodukt, für das aussagekräftige Ökobilanzen erarbeitet wurden: Fensterrahmen. In österreichischen [19, 20], niederländischen [21] und Schweizer [22] Studien wurden die Umweltauswirkungen von Fensterrahmen aus Holz, Aluminium und PVC verglichen.

Berücksichtigt man Unterschiede in der Stromherstellung zwischen Österreich, der Schweiz und Deutschland, ergeben sich für Holz- und PVC-Fenster sehr ähnliche Umweltauswirkungen. Ökologisch noch günstiger wird die Beurteilung für PVC-Fenster bei Berücksichtigung ihrer Recyclingfähigkeit. PVC-Fenster mit einem Recyclanteil bis zu 60% werden bereits hergestellt [23]. Und auch die Herstellung von PVC-U-Recyclingprofilen, welche die gleiche Qualität wie Profile aus Neumaterial erreichen müssen, ist ökologisch vorteilhaft zu bewerten.

Mit der europäischen Normung werden auch für den Rohrleitungsbereich die Voraussetzungen und Lösungen für die Verwendung von recycelten Materialien aus Rohren und Formstücken hergestellt und die Voraussetzung für die Einarbeitung in die Rezeptur bei der Fertigung von neuen Rohren und Formstücken geschaffen. Auch für PVC-U-Rohre liegen zumindest Energiebilanzen vor, die gegenüber anderen Rohwerkstoffen wesentlich günstiger liegen [24].

Aussagefähige ÖKO-Bilanzen für Rohre aus unterschiedlichen Werkstoffen werden derzeit erarbeitet.

die Bewertung in Brandfällen geschaffen [25]. Unabhängig von allen technischen Vorteilen ist interessant, daß PVC versicherungstechnisch gleichwertig, wie alle anderen üblichen Baustoffe bewertet wird. Ein erhöhtes Risiko ist daher auch nicht in der Festlegung von Brandversicherungsprämien zu erkennen, zumal PVC-U im Sinne des vorbeugenden Brandschutzes Vorteile aufgrund seiner Schwerentflammbarkeit nach DIN 4102, Teil 1 [26] aufweist.

Fragen zur Salzsäureemission aus einfachen Müllverbrennungsanlagen, der Cadmiumsubstitution und der Weichmacherdiskussion sind wissenschaftlich und sachbezogen diskutiert und ihren Lösungen zugeführt worden. So sind z. B. unter Vorsorgegesichtspunkten durch die TA Luft 1986 [27] Grenzwerte für die Reingasemission vorgeschrieben, die Belästigungen oder gar Umweltgefährdung sowohl im Nah- wie Fernbereich von Müllverbrennungsanlagen ausschließen.

Das Auftreten von Dioxinen und Furanen im Brandfall ist keine PVC-spezifische Erscheinung. Dioxine und Furane werden bei allen Verbrennungsprozessen nachgewiesen, bei denen chlorhaltige Verbindungen beteiligt sind; z. B. auch bei, in der Natur vorkommenden organischen Produkten wie Holz, Kohle und Tabak etc. Mehrere Forschungsvorhaben haben gezeigt, daß sich bei gezieltem Zusatz von PVC-U in Verbrennungsanlagen die Dioxinmission nicht erhöht [28-34].

Sachverständigengutachten beweisen, daß bei Bränden in Gebäuden die PVC-Bauteile für

Tabelle 10: Vergleich der erforderlichen Wanddicken zum Erreichen gleicher Produkteigenschaften verschiedener Werkstoffe (Basis: PVC = 1)

Werkstoff	Steifigkeit	Reißfestigkeit	Sauerstoff-Sperre	Kohlensäure-Sperre
PVC	1,0	1,0	1,0	1,0
PE-LD	2,0	2,2	52,0	100,0
PE-HD	1,5	1,2	23,0	45,0
PP	1,3	1,1	18,0	35,0
PS	1	1,1	38,0	100
PET	1,1	0,9	0,4	1
Papier	10	3	-	-

die Gesamtemission von Dioxinen und Furanen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die durch Kunststoffbrände, z. B. in Lengerich 1992, verursachte Dioxinbildung in der Umgebung des Brandherdes, stellte nie eine Gefährdung der Bevölkerung dar; dies wurde in einer Mitteilung der Stadtverwaltung vom 13.12.1992, verlautbart, die auf entsprechenden Meßwerten basierte [35].

Mit der Politisierung der Umweltdiskussion, die ca. ab 1980 verstärkt zutage trat, änderte sich auch die vergleichsweise sachbezogene Auseinandersetzung um den Werkstoff PVC. Das Entstehen einer „Umweltschutzindustrie“ förderte die Instrumentalisierung der Umweltdiskussion. Nicht mehr abgesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse, sondern Emotionen stehen seit Anfang der 80er Jahre im Vordergrund der Auseinandersetzungen um den Werkstoff PVC.

Vordergründig wird PVC diskriminiert, das politische Ziel ist aber die Zerstörung eines bedeutenden Industriezweiges; nämlich der Chlorchemie und in letzter Konsequenz die

Vernichtung des gesamten Chemiestandortes Deutschland.

Mit bundesweiten Aktionen fordern die sogenannten Umweltschutzorganisationen und die von ihnen fehlinformierten Politiker von Behörden und Versorgungsbetrieben den Verzicht auf PVC-U im Hoch- und Tiefbau. Generelle Verbote von PVC wurden zwar bislang nicht ausgesprochen und werden von der Europäischen Union auch entschieden abgelehnt. Wohl aber gibt es eine Reihe von Empfehlungen und Verordnungen auf Bundes-, Länder- und vor allem kommunaler Ebene, die erhebliche Beschränkungen für PVC-Produkte im Bauwesen mit sich bringen und faktisch bis zu einem Verbot gehen (siehe die Beispiele Berlin und Hessen).

Nach dem bisherigen Verlauf der von den sogenannten Umweltorganisationen betont sachlich geführten Kampagne kann man feststellen, daß seit den 60er Jahren das Bild von PVC, als eines anerkannt guten und vielseitigen Werkstoffes, systematisch zerstört und damit ein fortschreitender Akzeptanzverlust provoziert werden soll.

Seitens des Deutschen Bundestages war man bemüht zur Versachlichung der PVC-Diskussion beizutragen. Man setzte durch den Beschluß des Deutschen Bundestages vom 14. Februar 1992 die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt-Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltfreundliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft“ ein.

Das Ergebnis der Kommission, die aus Politikern und sachverständigen Fachleuten aller interessierter Kreise zusammengesetzt war, wurde mit der Bundestagsdrucksache 12/8260 vom 12.07.1994 veröffentlicht [36].

Als Fazit kann gesagt werden, daß die Kommission mehrheitlich die Meinung geäußert hat, daß eine ökologisch verträgliche Verwertung und Entsorgung von PVC möglich ist und intensiv weiterentwickelt werden sollte. Eine Substitution von PVC in den in der Studie beispielhaft betrachteten Anwendungen kann nicht empfohlen werden.

Rohrleitungen aus PVC-U, deren Langlebigkeit speziell durch die hier vorgelegten Untersuchungsergebnisse wiederum bestätigt wird, gehören zu diesen beispielhaft betrachteten Anwendungen.

Auch der im Sondervotum geforderte „ökologisch verträglichere Umgang mit PVC“ mit Rücknahme- und Verwertungspflichten für grundsätzlich recycelbare Produkte wird von PVC-U-Rohren bereits erfüllt. Die herstellende Kunststoffrohrindustrie kam dieser Forderung durch ihr von der Gütegemeinschaft Kunststoffrohre e.V. Bonn (GKR) organisiertes Rücknahme- und Verwertungssystem schon zuvor.

Es ist zu hoffen, daß sich die PVC-Diskussion in Zukunft auf einer sachlicheren Ebene, als in der Vergangenheit zu registrieren war, bewegt und daß dabei für erkannte Umweltauswirkungen konkrete Verbesserungsmaßnahmen erreicht werden.

Welt- und europaweit, aber auch national, beweisen steigende Produktionszahlen, daß PVC als Werkstoff trotz der anhaltenden Kritik sowohl am Bau, wo PVC mit ca. 56% seinen größten Absatzmarkt hat, als auch in anderen Wirtschaftszweigen, nicht wegzudenken ist. [37, 38].

GÜTEZEICHEN



KUNSTSTOFFROHRE

10 PVC-Diskussion

Trotz seiner anerkannten, hervorragenden, technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften, ist der Werkstoff PVC-U seit Ende der 60er Jahre in der Diskussion.

Die in den letzten Jahren verstärkten Angriffe richten sich vordergründig gegen die Werkstoffcharakteristika, welche von den Kritikern als „ökologisch problematisch“ betrachtet werden. Das strategische Ziel der Offensive ist in Wirklichkeit die sogenannte „Chlorchemie“, die mit der Bekämpfung des „Schlüsselproduktes PVC“ aufgebrochen werden soll – dieses Vorgehen ist durch zahlreiche Aussagen der Kritiker belegt. PVC-Gegner sind vorwiegend in außerparlamentarischen Organisationen zu finden, die sich vorgeblich dem Umweltgedanken verschrieben haben und die mit ihren Argumenten auf die Angst des Bürgers und auf sein Bedürfnis nach Umweltschutz setzen, um ihre in Wahrheit ganz anderen politischen Ziele zu erreichen.

Bis ca. 1980 war die Diskussion vergleichsweise sachbezogen – man befaßte sich anfänglich mit dem Brandverhalten. Entsprechend der Bedeutung von PVC als Bauwerkstoff haben Industrie, Wissenschaft und Behörden intensiv die relevanten brandschutztechnischen Aspekte untersucht und eine breite Basis für



Bild 14: Fotografische Dokumentation zum Untersuchungsbericht des DVGW-TZW Karlsruhe

Nach strenger wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Abwägung aller Fakten ist der Erhalt und die Weiterentwicklung des Werkstoffes PVC-U – gerade wegen der in Deutschland besonders anspruchsvollen umweltpolitischen Ziele – unbedingt erforderlich.

Die Ergebnisse aus der Diskussion um PVC beweisen, daß Umweltschutz sich nach fundierten, realisierbaren und technischen Grundlagen richten sollte und nicht zum Spielball von Emotionen, Halbwissen, Ideologien, politischen Interessen oder Wettbewerbskämpfen werden darf.

GÜTEZEICHEN



KUNSTSTOFFROHRE

11 Zusammenfassung

In Bitterfeld, der Wiege der PVC-U-Rohre, war es möglich einige Rohrabchnitte, welche annähernd 60 Jahre in Frischwasser-Versorgungsleitungen unter 4 bis 5 bar Innendruck Verwendung fanden, zu entnehmen. Deren Untersuchung zeigt, daß die um 1935-1940 stranggepreßten Rohre nur geringfügig von heute extrudierten PVC-U-Rohren abweichende Eigenschaften besitzen. Natürlich liegt ihr Zeitstand-Innendruckverhalten mit einer Dimensionierungsspannung von ca. 5 N/mm² noch um etwa den Faktor 2 unter dem heutiger PVC-U-Rohre.

Die durchgeführten Zeitstand-Innendruckprüfungen bei 60°C liefern aber Kennlinien, die zwar unterhalb der heute nach DIN 8061 gültigen Zeitstandkennlinien liegen. Sie verlaufen im Prüfungszeitraum (> 10000 h) aber ebenfalls linear und nahezu parallel zu der heute geforderten Mindestbruchkurve.

Aus den bei 60°C gewonnenen Zeitstand-Innendruck-Ergebnissen lassen sich bei Einsatztemperaturen von 20°C (Frischwasser) bzw. 40°C (Abwasser) nach den erreichten Betriebszeiten noch weitere Restlebensdauern von mehr als 100 Jahren ableiten.

Neben der ausführlichen Darstellung der durchgeführten Untersuchungen, deren Ergebnisse und den daraus gezogenen Schlußfolgerungen wird auch die Entwicklungsgeschichte des Konstruktionswerkstoffes PVC-U und des Chemiestandortes Bitterfeld dargelegt.

Zur Ergänzung wird auf die ökonomische und ökologische Bedeutung des Werkstoffes PVC-U hingewiesen und die ideologisch-politische Diskriminierung dieses Rohrwerkstoffes diskutiert.

Der Einsatzbereich der Rohre und Formstücke wird dargestellt und die vielen positiven Eigenschaften des Konstruktionswerkstoffes PVC-U in Erinnerung gebracht.

Damit wird dokumentiert, daß PVC-U als Konstruktionswerkstoff für Rohrleitungssysteme in der Ver- und Entsorgung derzeit nur unter erheblichen ökologischen, technischen und ökonomischen Nachteilen durch andere Werkstoffe ersetzt werden kann (siehe Tabelle 10).

Literatur:

- [1] Schönburg, Hauße, Niendorf, Ulrich, Hoff, Grasl, Kittler, Wick: Interne Mitteilungen der I.G. Bitterfeld
- [2] W. Buchmann: a) Z. VDJ Bd. 84 (1940) S. 425 - 431
b) Forschung Ing.-Wesen Bd. 12 (1941) S. 174 - 181
c) Kunststoffe Bd. 30 (1940) S. 357 - 365
d) Krannich: Kunststoffe im tech.-Korrosionsschutz J.F. Lehmann-Verlag München/Berlin 1943 S. 43 - 120
- [3] W. Krannich: a) Kunststoffe Bd. 31, (1941) S. 192 - 194
b) Chemische Fabrik Bd. 13 (1940) S. 233 - 237
c) Kunstseide und Zellwolle Bd. 6 (1941) S. 201 - 206
d) Kunststoffe im technischen Korrosionsschutz, J.F. Lehmann-Verlag 1943
- [4] DIN 8061: Kunststoffrohre aus Polyvinylchlorid (Rohrtyp) – Eigenschaften und Richtlinien für die Verwendung (Juli 1941)
- [5] DIN 8062: Kunststoffrohre aus Polyvinylchlorid (Rohrtyp) – Maße (Juli 1941)
- [6] Bitterfelder Chronik: Chemie AG-Bitterfeld-Wolfen 1993
- [7] H. Lindner: Werkstoffe für Trinkwasserleitungen KRV-Nachrichten 3/83, S. 4 - 7
- [8] E. Barth: Das Langzeitverhalten von Trinkwasser-Versorgungsrohren aus PVC-U KRV-Nachrichten 1/93, S. 1 - 8
- [9] E. Barth: Das Langzeitverhalten von Rohren aus PVC-U, 3 R international 30 (1992) Nr. 5, S. 271 - 278
- [10] Eckstein: Twenty years old PVC-Pressure Pipe excavation and evaluation. Uni-Bell Pipe Association, 2655 Villa Greek, Dallas, USA, Juni 1988
- [11] E. Barth: Das Verhalten von PVC hart gegenüber Chemikalieneinwirkung, Zeitschrift für Kunststofftechnik 17, (1986), S. 66 - 74 und S. 98 - 108
- [12] Tötsch, W.: Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz Gaensslen, H.: eines Standardkunststoffes Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln (1990)
- [13] Gülpen, E. et. al: Natriumchlorid in Ullmann's Enzyklopädie der technischen Chemie, Band 17 (1980) S. 179 - 190
- [14] Habersatter: Ökobilanz von Packstoffen (Herausgeber: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)), Schriftenreihe Umwelt 132, Bern 1991
- [16] Keil, U.: Qualitätsverhalten, Maschinenmarkt 8/91
- [17] Herstellerangaben: Sterimed Gesellschaft für medizinischen Bedarf m.b.H., Saarbrücken
- [18] Novak, E., Ecker, A.: Ökologische Betrachtung der Fensterwerkstoffe Kunststoff, Aluminium, Holz, Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Wien 1991
- [19] Berger, Pichler, Stundner: Ökologische Betrachtung der wichtigsten Fensterwerkstoffe PVC, Holz und Aluminium, Traun, 1988.
- [20] Novak, Eckler: Vergleich der Fensterprofilwerkstoffe Kunststoff, Aluminium, Holz, Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Wien, Juli 1990
Novak, E.: Ökologische Betrachtung der Fensterwerkstoffe Kunststoff, Aluminium, Holz, Österreichisches Kunststoffinstitut, Wien, 1994
- [21] Lindeiger et. al.: Umweltbeeinflussung durch Fenster, Centrum für Umweltkunde, Leiden (NL), Juni 1990
- [22] Richter, K.: Untersuchungen zur Ökobilanz von Holz, Holz/Alu und Kunststoff-Fenstern. EMPA St. Gallen, Abt. Holz, April 1991
- [23] Berndtsen, N., Hofmann, V.: Coextrudierte Fenster aus Regenerat und Neuware. Kunststoffe 81 (1991) 1c.
Güterl, M., Schüle, H.: Werkstoffliches Recycling am Beispiel von PVC-Fensterprofilen Bauen mit Kunststoffen 6/1993 und 1/1994
- [24] Schulte: Bedeutung des Werkstoffes PVC-U bei Trinkwasser-Hauptleitungen. KRV-Nachrichten 1/93, S. 8 - 12
Tötsch, W., H. Polack: PVC und Ökobilanz
- [25] M. Engelmann, J. Skura: PVC im Brandfall. Brandschutz/DFZ 8/1992, S. 510 - 513
Binder, G.: Erfahrungen mit Bränden unter Beteiligung von PVC. Brandschutz/DFZ, 2/1994, S. 93 - 97
- [26] DIN 4102, Teil 1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Baustoffe – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- [27] TA-Luft: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft vom 27. 2. 1986. Gemeinsames Ministerialblatt 37. Jahrg. Nr. 70, 28. 2. 86
- [28] Vogt et. al.: Das 3r-Verfahren, ein Beitrag zur Schadstoffminimierung bei der Müllverbrennung. VGB-Kraftwerkstechnik 68. Jahrg. 3/1988, S. 258
- [29] Reimann, D.O.: PVC als Abfallprodukt. Müll und Abfall 6/1988
- [30] Reimann, D.O.: Einfluß von PVC auf die Müllverbrennung. Entsorgungspraxis 5/1990
- [31] Kerasek et. al.: Gas-Chromatographie – Mass-Spectrometric Study on the Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-Dioxins and Polychlorobenzenes from Polyvinylchloride in municipal incinerator. Journal of Chromatography 270 (1983) S. 227 - 234
- [32] Olie et. al.: Chemosphere, Vol. 12 (1983), no. 415, S. 627 - 636
- [33] Ballschnitter: Entstehung der Polychloridibenzo-Dioxine (PCDD) und -Furane (PCDF) bei der Müllverbrennung und anderen Verbrennungsprozessen. FGK-Seminar, Berlin, Mai 1984, Referat 103
- [34] Informationsschrift des VKE: PVC – Ursache für Dioxin-Bildung? Frankfurt/Main, Juni 1985
- [35] Stadtverwaltung Lengerich: Mitteilung vom 13. 12. 1992
- [36] Deutscher Bundestag: Bericht der Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt-Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft, Drucksache 12/8260 v. 12. 7. 1994
- [37] Pastuska, G.: Baustoffe zwischen Ökologie und Ökonomie, Berliner Bauwirtschaft Heft 1-2, 1990
- [38] IBK Darmstadt: Ist PVC im Bauwesen zu ersetzen? B 15 - 800 191 - 10