



## LOK- und CAPO-Test; zwei Ausziehversuche zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit



Peter Walter VEIT, Dipl.-Ing., Jahrgang 1959, Studium des Wirtschaftsingenieurs für Bauwesen an der TU-Graz, von 1984 bis 1987 Studienassistent bzw. Assistent am Institut für Werkstoffkunde, Festigkeitslehre und Materialprüfung, seit April 1987 Assistent am Institut für Eisenbahnwesen der TU-Graz.

Bei den in Skandinavien und der USA entwickelten Ausziehversuchen zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit wird durch die Geometrie der Versuchsgeräte erreicht, daß die Ausziehkraft ein direktes Maß der Betondruckfestigkeit darstellt. Außerdem ist die Standardabweichung der Versuche relativ gering (8% bei B 500, 12% bei B 300), so daß diese Festigkeitsuntersuchung ohne Zusatzversuche an Parallelproben durchgeführt werden kann. Im Rahmen meiner Diplomarbeit wurden am Institut für Werkstoffkunde, Festigkeitslehre und Materialprüfung LOK- und CAPO-Test untersucht und mit anderen Verfahren zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit verglichen.

### 1. Versuchsdurchführung

Bei beiden Prüfmethoden handelt es sich um Ausziehversuche, wobei beim LOK-Test eine mitbetonierte Stahlscheibe, beim CAPO-Test eine nachträglich eingebaute aus dem Beton gezogene wird. Durch die Geometrie der Versuche stellt die in bar gemessene Ausziehkraft ein direktes Maß der Betondruckfestigkeit dar. Sowohl LOK- als auch CAPO-Test werden mit demselben Gerät — Gewicht rund 5 kg — durchgeführt. Es besteht im wesentlichen aus einem Kolben, der hydraulisch betätigt wird und an dem über eine Kupplung ein Zugstab befestigt werden kann. Mit Hilfe dieses Stabs können die Ausziehteile aus dem Beton gezogen werden.

Beim LOK-Test, seine Wirkungsweise ist in Abbildung 1 dargestellt, wird eine runde Ausziehscheibe, Durchmesser 25 mm, in einer Tiefe von 25 mm einbetoniert, wobei die Scheibe durch einen Distanzstab in ihrer Lage gehalten wird. Durch das Lösen dieser Schraube kann ausgeschalt werden. Dabei verhindert die Abschrägung an der Ausziehscheibe ein Mitdrehen des Ausziehteils. Nach dem Entfernen der Schalung wird der Distanzstab herausgedreht. Nun kann mit dem eigentlichen Versuch begonnen werden. An Stelle des Distanzstabes wird ein Zugstab in die Ausziehscheibe eingeschraubt. Dieser Zugstab wird mittels einer Kupplung an das Hydraulikgerät angeschlossen, das sich über einen Gegenpreßring an der Betonoberfläche abstützt. Durch das Aufbringen der Ausziehkraft, dies geschieht durch Drehen einer Handkurbel, bilden sich die eingezeichneten Druckstreben, eigentlich ein Druckkonus aus.

Abbildung 2 zeigt den CAPO-Test. Bei diesem Versuch wird eine Bohrung, Durchmesser 18 mm, normal zur Betonoberfläche

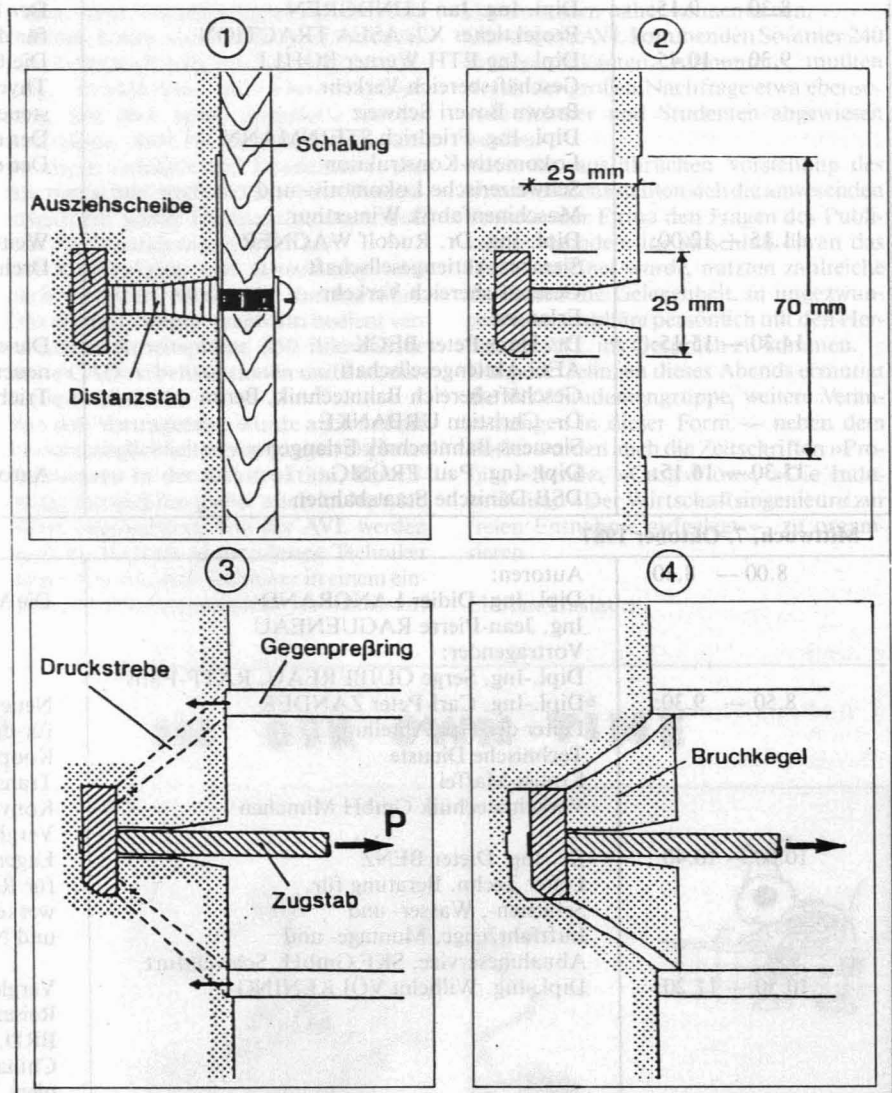


Abb. 1: LOK-Test

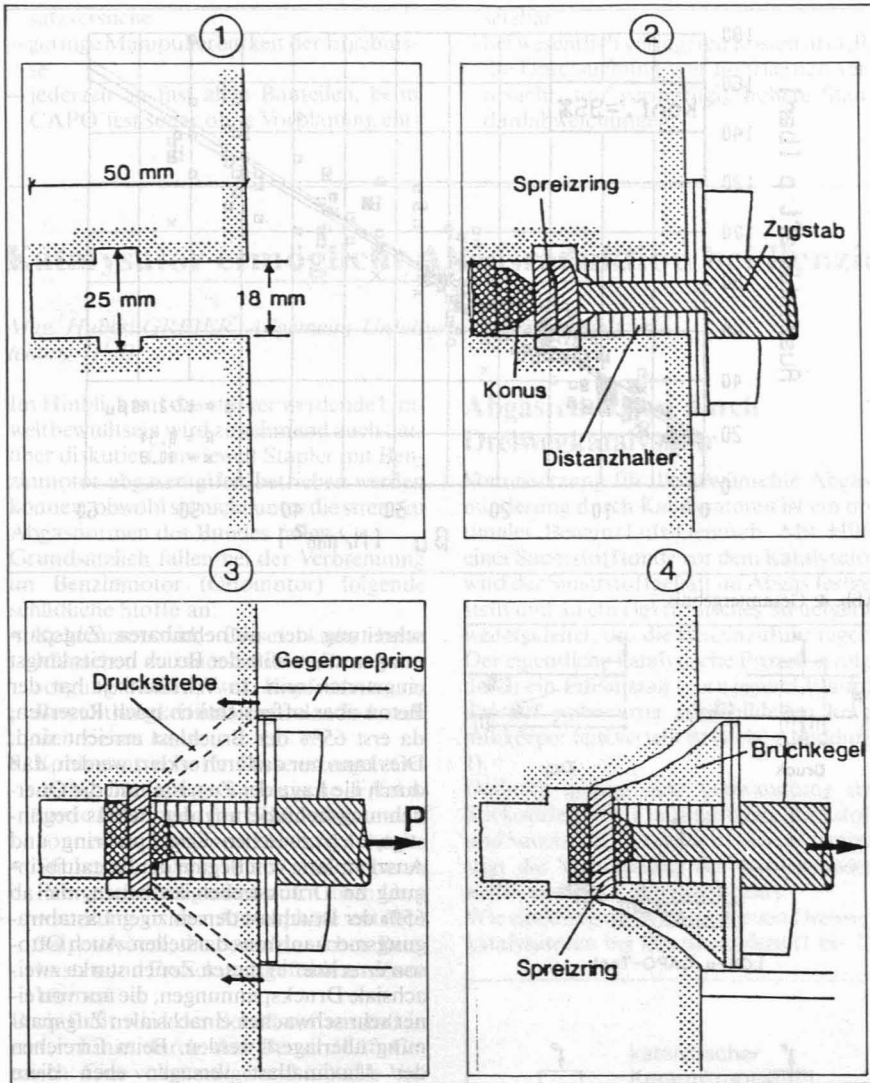


Abb. 2: CAPO-Test

che bis in eine Tiefe von 5 cm eingebracht, danach mit einem Fräser in einer Tiefe von 25 mm auf einen Durchmesser von 25 mm aufgeweitet, und ein Zugstab in das Loch eingesetzt. Am Ende des Stabes ist ein Spreizring aufgesteckt. Dieser Ring, der das eigentliche Ausziehteil darstellt, wird von einem auf den Zugstab geschraubten Konus gehalten. Durch Schrauben des Zugstabes bis zu einer markierten Stelle wird der Spreizring durch den Distanzhalter auf den Konus geschoben und so aufgeweitet. Am Ende dieses Vorganges liegt er satt auf der Nut des Konus auf. Diese Situation entspricht jener des LOK-Tests. Es wird nun wieder das Versuchsgerät, hier mit einer etwas anders konstruierten Kupplung, angeschlossen; und auch der Gegenpreßring braucht nur durch ein Zwischenstück verlängert zu werden. Beim Aufbringen der Ausziehungskraft bilden sich ebenfalls Druckstreben wie beim LOK-Test aus, und auch die Bruchfiguren sind fast ident.

## 2. Versuchsprogramm

Zur Ermittlung der Eigenschaften von

LOK- und CAPO-Test wurde ein Versuchsprogramm erstellt (Abb. 3), in dessen Rahmen rund 200 LOK-Tests und 150 CAPO-Tests durchgeführt wurden. Dabei wurde versucht, Aussagen über die Abhängigkeit der Verfahren von verschiedenen Betonkennwerten zu erhalten. So wurden Betone der Festigkeitsklassen B 120, B 225, B 300 und B 500 hergestellt. Dabei kam Größtkorn 32 mm zur Anwendung, B 225 und B 300 wurden aber auch mit Größtkorn 16 mm hergestellt. Außerdem wurden sämtliche Betone mit Rund- und Kantkorn gefertigt. Des weiteren wurde Nachbehandlung und Prüfalter variiert. Von den so erhaltenen 12 Betonrezepten wurden je 24 Würfel (20 cm Kantenlänge) hergestellt. Eine Prüfsérie bestand dabei aus 3 Würfeln, wobei 2 zur Feststellung der Betondruckfestigkeit zerstörend in einer Presse geprüft wurden. Der Mittelwert der beiden Ergebnisse diente als »wahre Festigkeit«. Beim dritten Probewurfel wurden je zwei LOK- und CAPO-Tests durchgeführt, so daß bei jeder Versuchsserie vier Ergebnisse von Ausziehversuchen einer »wahren Festigkeit« gegenüberstanden. Die unterschiedliche Anzahl der durchgeführten LOK- und CAPO-Tests ergab sich dabei aus den für die Versuche unterschiedlichen Mindestfestigkeiten und verschiedenen Ausfallwahrscheinlichkeiten.

## 3. Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte folgendes:

1. LOK- und CAPO-Test liefern praktisch gleichwertige Ergebnisse und sind von den Betonkennwerten unabhängig.
2. Die Nachbehandlung des Betons hat auf die Güte der Ergebnisse fast keinen Einfluß.

	Nachbehandlung											
	N				F				FF			
	Alter											
	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
B120 GK32 R	•	•	•	•		•	•	•				•
B225 GK32 R	•	•	•	•		•	•	•				•
B300 GK32 R	•	•	•	•		•	•	•				•
B500 GK32 R	•	•	•	•		•	•	•				•
B225 GK16 R	•	•	•	•		•	•	•				•
B300 GK16 R	•	•	•	•		•	•	•				•
B120 GK32 K	•	•	•	•		•	•	•				•
B225 GK32 K	•	•	•	•		•	•	•				•
B300 GK32 K	•	•	•	•		•	•	•				•
B500 GK32 K	•	•	•	•		•	•	•				•
B225 GK16 K	•	•	•	•		•	•	•				•
B300 GK16 K	•	•	•	•		•	•	•				•

N...Nachbehandlung laut ÖNorm  
 F...nur einen Tag feucht gelagert  
 FF...bis zur Prüfung feucht gelagert

8 Serien zu je 3 Würfeln

Abb. 3: Versuchsprogramm



3. Es zeigt sich kein Unterschied zwischen Rund- und Kantkornbetonen, was wiederum maßgeblichen Einfluß der Zugspannungen ausschließt.

4. Je größer das Zuschlagskorn, desto größer die Streuung.

Das wichtigste Ergebnis der Versuchsserie war aber, daß die Ausgleichsgeraden bei allen Detailauswertungen nahezu ident waren. Es ist daher möglich, eine allgemein gültige Auswertungsgerade aufzustellen, die hier mit ihrem 98% Konfidenzintervall und dem Korrelationskoeffizienten von  $R = 0,95$  angegeben ist (Abb. 4). Bei der Untersuchung der Abhängigkeit der Standardabweichung von der Anzahl der Versuche, welche den in die Berechnung eingehenden Mittelwerten zugrunde liegen, zeigt sich, daß bei mehr als vier Versuchen die Standardabweichung nur geringfügig abnimmt, bei weniger Tests aber stark steigt. Außerdem hängt die Standardabweichung prozentuell gesehen von der Betongüte ab. Unter Zugrundelegung von 4 Versuchen beträgt die Standardabweichung bei B 500 8%, bei B 300 12% und bei B 225 14%.

## 4. Bruchverhalten

Der streng lineare Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Ausziehkraft — angegeben in bar — mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,95 weist auf einen echten Druckbruch hin. Deswegen wurden im Versuchsprogramm der Unterschied Rundkorn (Grazer Murschotter, ein quarzitisches Gestein) und Kantkorn (gebrochener, gewaschener Kalk aus der Obersteiermark) untersucht. Sollte die Zugfestigkeit nämlich maßgeblichen Einfluß auf das Bruchverhalten haben, müßte hier ein systematischer Unterschied auftreten, da der Zusammenhang Druckfestigkeit — Zugfestigkeit laut älteren Untersuchungen bei diesen Zuschlagsstoffen bis um das Doppelte streut. Das Nichtauftreten eines merklichen Unterschieds der Auswertungsgeraden für Rund- bzw. Kantkorn ist daher ein weiteres Indiz für die Annahme, daß es sich bei dem Bruch tatsächlich um einen Druckbruch handelt. Die geringfügig größere Streuung bei mit Kantkorn hergestellten Betonen läßt sich dabei durch die im Vergleich zum Rundkorn größere Oberfläche und daher bessere Haftung des Zementsteins mit dem Zuschlagsstoff erklären. Außerdem geht der Zementstein mit Kalkzuschlägen in oberflächennahen Bereichen zusätzlich eine chemische Verbindung ein. Das hat zur Folge, daß bei Kantkornbeton der Bruch auch durch größere Zuschlagskörner geht, was bei der Auswertung Ausreißer nach oben und somit eine erhöhte Standardabweichung nach sich zieht.

Abbildung 5 zeigt die Anordnung einer Druckprüfung ( $\alpha = 90^\circ$ ) und einen Probekörper, der sicher aufgrund Überschreitens von Schub- und Zugfestigkeit brechen wird ( $\alpha = 30^\circ$ ). Es ist daher eine Funktion des Winkels  $\alpha$ , ob sich noch Druckstreben aus-

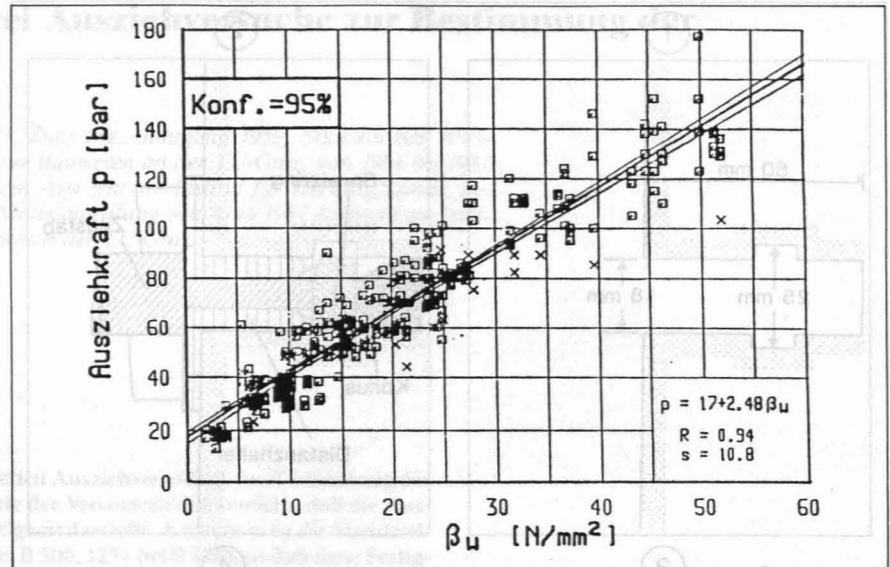


Abb. 4: Gesamtergebnis

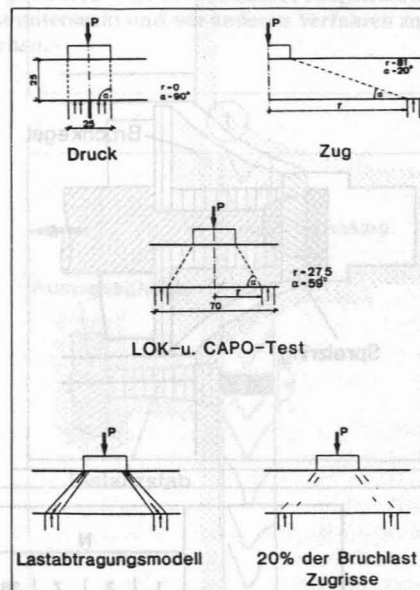


Abb. 5: Bruchverhalten

bilden können oder nicht. Das aufgrund der Versuchsergebnisse erstellte Lastabtragungsmodell für LOK- und CAPO-Test geht davon aus, daß sich bei  $\alpha = 59^\circ$  noch ein Druckkonus ausbilden kann. Eine FE-Untersuchung von Ottosen stimmt dabei mit den Versuchsergebnissen gut überein und bestätigt somit das Lastabtragungsmodell. Bei stufenweiser Erhöhung der Ausziehkraft errechnet Ottosen zuerst Radialrisse innerhalb des Gegenpreßrings, Risse, die man während der Versuche beobachten konnte und die eindeutig auf Biegung zurückzuführen sind. Bei ungefähr 20% der Bruchlast errechnet Ottosen Risse zwischen Ausziehplatte und Gegenpreßring und weist nach, daß es sich dabei um Zugrisse handelt. Bei weiterer Belastung wachsen diese Risse zwar, aber bei rund 65% der Bruchlast kommt dieses Risßwachstum gänzlich zum Erliegen. Nimmt man also einen Bruch aufgrund Über-

schreitung der aufnehmbaren Zugspannungen an, müßte der Bruch bereits längst eingetreten sein. In Wirklichkeit hat der Beton aber offensichtlich noch Reserven, da erst 65% der Bruchlast erreicht sind. Dies kann nur dadurch erklärt werden, daß durch die Lage der Zugrisse und die Querdehnungsbehinderung des Betons begünstigt, sich zwischen Gegenpreßring und Ausziehplatte von Beginn der Lastaufbringung an Druckstreben aufbauen, die ab 65% der Bruchlast den einzigen Lastabtragungsmechanismus darstellen. Auch Ottosen errechnet in diesen Zonen starke zweiachsigale Druckspannungen, die nur von einer sehr schwachen einachsialen Zugspannung überlagert werden. Beim Erreichen der Maximallast versagen eben diese Druckstreben aufgrund von Spaltzugrisen, aber gerade das ist der typische Druckbruch bei Beton.

## 5. Vorteile von LOK- und CAPO-Test

Aus Eigenschaftsvergleichen mit anderen Prüfmethode zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit, wie z.B. der Prüfung von Probewürfeln, Bohrkernen oder der Untersuchung mit dem Rückprallhammer lassen sich die Stärken der neuen Prüfmethode erkennen. Die sich dabei ergebenden **Hauptvorteile** für LOK- und CAPO-Test sind:

- großer Prüfbereich von unter 5 bis 70 N/mm<sup>2</sup>
- Festigkeitsprüfung am Bauwerksbeton, was die Unsicherheiten im Zusammenhang Bauwerksbeton — Probekörper ausschließt
- direkte Prüfung der Druckfestigkeit, was mit Unsicherheiten behaftete Umrechnungen von anderen gemessenen Eigenschaften auf die Druckfestigkeit überflüssig macht
- sofortiges Prüfergebnis ohne zeitraubende Probekörperherstellung oder Zu-



—satzversuche  
—geringe Manipulierbarkeit der Ergebnisse  
—jederzeit an fast allen Bauteilen, beim CAPO-Test sogar ohne Vorplanung ein-

setzbar  
—bei wesentlich geringeren Kosten als z.B. die Untersuchung von Bohrkernen verursacht, nur geringfügig höhere Standardabweichungen.

**Hauptnachteil** der Versuche:  
—noch wenig eingeführt und daher noch nicht Bestandteil von vom Bauherrn oder den ÖNORMEN geforderten Festigkeitsuntersuchungen.

## Katalysator ermöglicht Abgasreduktion bei Benzinstaplern

Mag. Hubert GREIER, Allgemeine Unfallversicherungsanstalt, Abteilung HUB

Im Hinblick auf das stärker werdende Umweltbewußtsein wird zunehmend auch darüber diskutiert, inwieweit Stapler mit Benzinmotor abgasentgiftet betrieben werden können, obwohl sie nicht unter die strengen Abgasnormen des Bundes fallen.

Grundsätzlich fallen bei der Verbrennung im Benzinmotor (Ottomotor) folgende schädliche Stoffe an:

- Kohlenmonoxid: Dieses kann beim Menschen zu einer Sauerstoffunterversorgung führen, was Kopfschmerzen, Bewußtlosigkeit und sogar den Tod nach sich ziehen kann.
- Kohlenwasserstoffe: Diese erzeugen Geruchsbelästigung, narkotische Effekte sowie Reizungen der Schleimhäute und können zu Lungenentzündung führen.
- Stickoxide: Diese treten bei höheren Fahrgeschwindigkeiten auf. Durch Umwandlung in der Atmosphäre entsteht Salpetersäure, die beim Menschen Reizhusten und Erstickengefühle auslösen können.

Beeinflußt wird der Schadstoffausstoß in erster Linie durch das Benzin/Luft-Gemisch. Eine vollständige und schnelle Verbrennung erfolgt bei einem Mischungsverhältnis von 1:15. Eine dabei wichtige Kennzahl ist die Luftzahl ( $\lambda$ ). Im Idealfall beträgt diese

$$\frac{\text{angesaugte Luftmenge}}{\text{theoretischer Luftbedarf}} = 1.$$

Ist die angesaugte Luftmenge zu groß ( $\lambda > 1$ ), spricht man von einem Magergemisch. Ein relativ hoher Benzinverbrauch sowie Umweltverschmutzung sind die Folgen. Ein fettes Gemisch wird dann beobachtet, wenn die angesaugte Luftmenge zu gering ist ( $\lambda < 1$ ). In diesem Fall ist die Verbrennung relativ langsam. Schlechter Wirkungsgrad, Überhitzung des Motors sowie Umweltverschmutzung resultieren daraus. Da in concreto Idealzustände nicht erreichbar sind, muß das Benzin/Luft-Gemisch durch Vergaser bzw. Einspritzvorrichtungen den alternativen Betriebszuständen (Leerlauf, Vollast etc.) angepaßt werden. Die Bandbreite der Abgasreduktion ist jedoch relativ gering: Wird zu stark abgemagert, gibt es Fehlzündungen und einen relativ hohen Ausstoß von Kohlenwasserstoffen (HC). Bei einer zu starken Gemischanreicherung steigen hingegen Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC).

### Abgasreduktion durch Dreiwegkatalysator

Voraussetzung für die gewünschte Abgasminderung durch Katalysatoren ist ein optimales Benzin/Luft-Gemisch. Mit Hilfe einer Sauerstoffsonde vor dem Katalysator wird der Sauerstoffgehalt im Abgas festgelegt und an ein elektronisches Steuergerät weitergeleitet, das die Benzinzufuhr regelt. Der eigentliche katalytische Prozeß erfolgt durch ein Edelmetall (vorwiegend Platin), das auf wabenartig ausgebildetem Keramikkörper fein verteilt ist (siehe Abbildung 1).

Dadurch gelingt eine Umwandlung der Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) in ungiftigen Stickstoff und Sauerstoff. Letzterer wiederum begünstigt die Verbrennung der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxids.

Wie eindeutig die Wirkungen von Dreiwegkatalysatoren bei Benzinstaplern (1 bis 1,5

und Stickoxid 26,1%. Einen Vergleich prozentuell gemessener Schadstoffwerte bietet Tabelle 2.

### Ökonomische Aspekte

Der betriebswirtschaftliche Anreiz, Stapler mit 3-Weg-Katalysator auszurüsten, muß in seiner Mehrdimensionalität gesehen werden. Zunächst ist festzuhalten, daß eine Ausrüstung mit Katalysator zu höheren Investitionsausgaben führt (rund 10 — 15 Prozent vom Anschaffungswert). Dies hat wiederum zur Folge, daß sich die Kosten (z.B. kalkulatorische Abschreibung) während der Nutzungsdauer erhöhen. Eine Betrachtung des Kostenbildes zeigt somit, daß der Betrieb in seiner Produktpreiskalkulation einen höheren Prozentsatz anwenden muß, als es bei Staplern ohne Katalysator der Fall wäre. Um jedoch eine ökonomi-

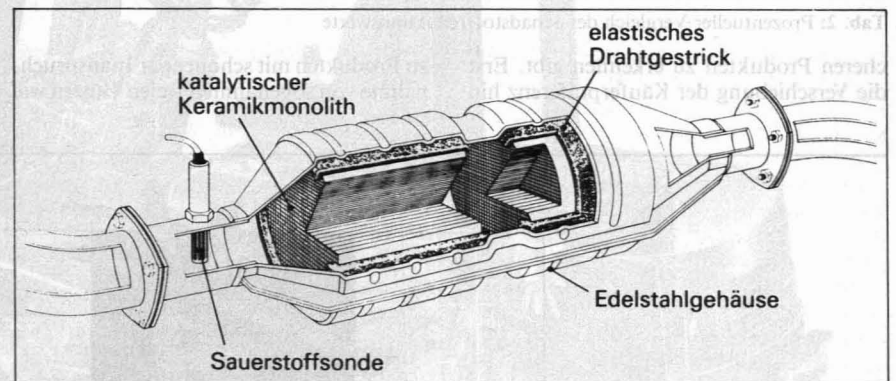


Abb. 1: Aufbau eines Drei-Weg-Katalysators

Tonnen Tragkraft) sind, zeigen nachstehende Meßergebnisse der Ingenieurschule Biel-Schweiz:

Benzinbetriebene Stapler weisen mit einem 3-Weg-Katalysator erheblich geringere Schadstoffwerte im Abgas auf als Fahrzeuge gleichen Typs ohne Katalysator. So gelingt beim Kohlenmonoxid eine Reduktion um 90,7%, bei Kohlenwasserstoffen eine Verringerung um 92,5% und bei Stickoxiden eine Herabsetzung von 97,1%. Werden Stapler mit 2-Weg-Katalysatoren ausgerüstet, ergeben die gemessenen Reduktionen in Relation zu Fahrzeugen ohne Katalysatoren folgende Werte: Kohlenmonoxid 79,5%, Kohlenwasserstoffe 67,5%

sche Investitionsentscheidung treffen zu können, ist die Erlösseite miteinzubeziehen. Anders formuliert: Honoriert der Markt die Zusatzausrüstung Katalysator? Wird von der Annahme ausgegangen, daß es sich um keinen Monopolmarkt (Anbieter- bzw. Nachfragermonopol) handelt, stellt der herrschende Marktpreis eine kaum beeinflussbare Größe dar. D.h. die Kosten müssen aus dem betrieblichen Gewinnpolster getragen werden. Diese Tatsache alleine verleitet jedoch keinen Betriebswirt, vom Grundsatz der Kostenminimierung abzuweichen. Einzelwirtschaftlich wird dies solange der Fall sein, bis der Konsument seine Neigung zu umweltfreundli-