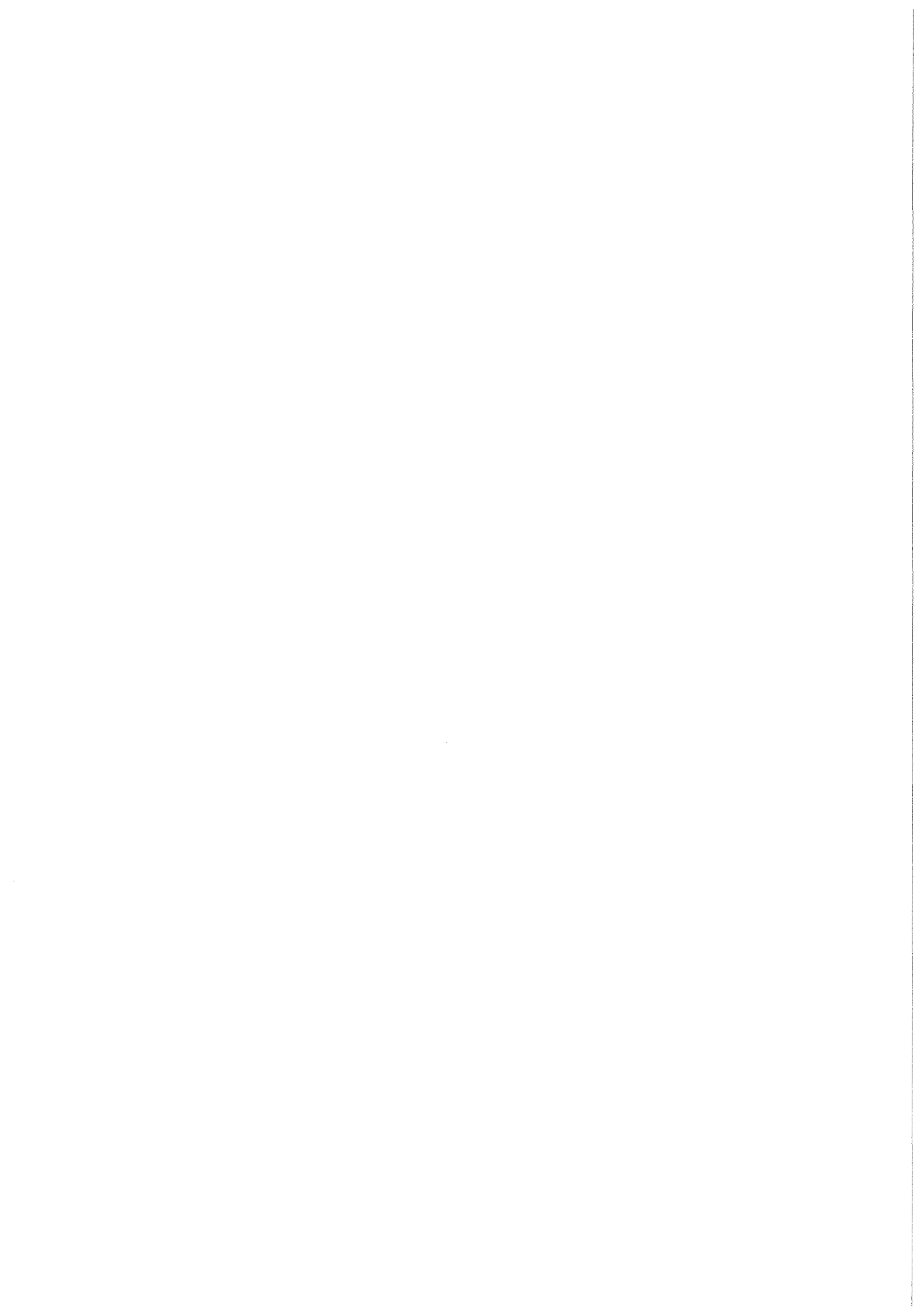


KfK 3877
EUR 9607 d
Juni 1985

**Test eines Meßeinsatzes mit
2 Local-Flow Turbinen,
2 Dragbodies,
einer Full-Flow Turbine
und einem 2-Strahl-Densitometer
der LOBI-Anlage in
transienter Zweiphasenströmung**

H. John, E. Ohlmer, W. Schulze, G. Weste, J. Reimann, G. Eisele
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

KfK-3877
EUR 9607 d

Test eines Meßeinsatzes mit 2 Local-Flow Turbinen, 2 Dragbodies,
einer Full-Flow Turbine und einem 2-Strahl-Densitometer der LOBI-Anlage
in transientser Zweiphasenströmung

H. John, E. Ohlmer*, W. Schulze*, G. Weste*, J. Reimann, G. Eisele

* Forschungsanstalt Ispra, LOBI Projekt, Ispra, Varese, Italy

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Eine Meßstrecke mit einem Innendurchmesser von 46 mm, bestückt mit Meßgeräten, die im LOBI-Kreislauf (GFS-Ispra) zum Einsatz kommen, wurde in in-stationärer Zweiphasenströmung (Blowdown) getestet. Die Massenströme, die durch Kombination der Meßwerte der zwei Dragbodies, zwei Local-Flow-Turbinen, einer Full-Flow-Turbine und einem Zweistrahl-Gamma-Densitometer gewonnen wurden, wurden mit der Referenzmessung eines True Mass Flow Meters verglichen und interpretiert. Die Messung des 2-Strahl-Gamma-Densitometers wurde zusätzlich mit einem 5-Strahl- und einem 6-Strahl-Gamma-Densitometer verglichen.

Test of a Mass Flow rate measuring Spool Piece in transient Steam Water Flow

Abstract

A spool piece with 46 mm inner diameter containing 2 local flow turbines, 2 drag bodies, a two-beam gamma densitometer and a full flow turbine designed for measuring two-phase mass flow rate in the LOBI-installation (J.R.C. Ispra) was tested in transient steam water flow (blowdown). The mass flow rates, calculated by different combinations of the 6 instrument readings have been compared with the mass flow rate measurement of a True Mass Flow Meter. The results are presented and interpreted in the report.

Inhalt:

Zusammenfassung

Abstract

1. Einleitung
2. Testkreislauf für instationäre Zweiphasenströmung
 - 2.1 Kreislaufbeschreibung
 - 2.2 Referenz-Gamma-Dichtemessung
 - 2.3 Referenz-Massenstrom-Messung
3. Versuchsanordnung
4. Versuchsdurchführung
5. Auswertung der Versuchsergebnisse
 - 5.1 Berechnung der Dichte der Zweiphasenströmung
 - 5.2 Massenstromberechnung
 - 5.2.1 Dragbody + Gamma-Densitometer
 - 5.2.2 Turbinen + Gamma-Densitometer
 - 5.2.3 Turbinen + Dragbody
 - 5.2.4 Nullpunktskorrektur des Dragbody Meßwertes
6. Darstellung der Versuchsergebnisse
 - 6.1 Massenstromvergleich mit dem Referenzwert
 - 6.2 Dichtevergleich zwischen den Gamma-Densitometern
7. Interpretation der Versuchsergebnisse
8. Schlußfolgerungen

1. Einleitung

Für Experimente, die im Rahmen der Reaktorsicherheit den Kühlmittelverluststörfall behandeln, ist die Bestimmung des Zweiphasenmassenstromes von fundamentaler Bedeutung. Weltweit wurden deshalb eine Reihe von fast ausschließlich indirekt messenden Methoden entwickelt. Im vorliegenden Bericht wird ein indirektes Meßverfahren beschrieben, das in der Versuchsanlage LOBI (Large PWR Offnormal Behaviour Investigations) der Gemeinsamen Forschungsstelle (GFS) Ispra zur Massenstrom-Erfassung eingesetzt wird. Der Meßeinsatz war bestückt mit zwei lokal messenden Turbinendurchflußmessern (Local-Flow Turbinen), einer Zweistrahl-Gamma-Dichtemeßeinrichtung (Gamma-Densitometer), zwei Stauscheiben (Dragbodies) und einem global messenden Turbinendurchflußmesser (Full Flow Turbine).

In der LOBI-Anlage wurden in den Jahren 1979/83 etwa 30 Blowdown-Versuche durchgeführt, die hauptsächlich die Problematik eines "Großen Bruches" in der Hauptkühlmittelleitung von Druckwasserreaktoren untersuchten. Die experimentellen Messdaten dieser Untersuchung dienen vor allem zur Überprüfung und Verbesserung der Rechencodes zur Reaktorsicherheit. In diesem Zusammenhang sind Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messdaten von besonderer Bedeutung.

Bei dem indirekten Verfahren wird der Massenstrom aus den Meßsignalen von Geschwindigkeits-, von Impuls- und von Dichtemessgeräten unter Benutzung physikalischer Modelle abgeleitet. Dabei kann es zu erheblichen Fehlern kommen, weil die verwendeten Modelle auf vereinfachenden Annahmen beruhen, die für bestimmte Zweiphasen-Strömungsbedingungen ihre Gültigkeit verlieren können. Es wurde deshalb entschieden, die indirekte Massenstrombestimmung der LOBI Messgeräte experimentell auf ihren Unsicherheitsbereich zu überprüfen. Die Untersuchung wurde im Kreislauf für instationäre Zweiphasenmeßtechnik am Institut für Reaktorbauelemente (IRB) mit transientser Dampf-Wasserströmung (Blowdown) durchgeführt.

In dem Bericht wird nach einer Beschreibung des Testkreislaufs mit seinen wichtigsten Komponenten, des Meßeinsatzes mit den genannten Geräten, die Berechnung des Massenstromes aus den Meßsignalen und der Vergleich der Ergebnisse mit den Messungen der Referenzinstrumentierung behandelt. Die Dichtemeßergebnisse des LOBI-Densitometers werden zusätzlich mit denen des IRB-Densitometers (Referenz) und denen eines LIT-Densitometers verglichen.

2. Testkreislauf für instationäre Zweiphasenströmung

2.1 Kreislaufbeschreibung

Abb. 1 zeigt schematisch den Kreislauf für instationäre Zweiphasenströmung des IRB. Ein Druckbehälter von $0,7 \text{ m}^3$ Inhalt wird von einer benachbarten Kesselanlage aus mit siedendem (oder leicht unterkühltem) Wasser bis zu einem Druck von maximal 150 bar gefüllt. Über ein Bypasssystem mit Druckhalteventil kann dem Kessel ein höherer Druck als der Siededruck aufgeprägt werden. Die an den Kessel angeschlossene 8 m lange horizontale Rohrstrecke besteht aus geflanschten Rohrstücken (wahlweise Nennweite 50 oder 80) unterschiedlicher Länge. Sie dient dem Einbau der zu untersuchenden Meßgeräte (Meßeinsatz). In die horizontale Teststrecke kann ein U-förmiger senkrechter Teststreckenabschnitt eingebaut werden. Der Druckkessel kann in zwei Höhenpositionen eingebaut und dadurch wahlweise mit seinem unteren oder oberen Stutzen an den Teststreckenansfang angeschlossen werden. Hinter dem Teststreckenende ist als Referenzmassenstrom-Meßgerät das True Mass Flow Meter (TMFM) eingebaut. Der weitere Verlauf der Rohrleitung führt über das Schnellöffnungsventil in den Niederschlagsbehälter mit 5 m^3 Inhalt. Beim Auffüllen des Druckkessels zur Blowdown-Vorbereitung stehen die Teststrecke, einschließlich TMFM bis zum Schnellöffnungsventil unter Druck. Durch Bypaßleitungen kann die Teststrecke beim Auffüllen vorgewärmt werden. Mit dem Öffnen des Schnellöffnungsventils wird der Blowdown eingeleitet. Das durch den Druckabfall unter den Siedepunkt sich im Kessel bildende Zweiphasengemisch strömt durch die Teststrecke, das TMFM und durch das Schnellöffnungsventil in den Niederschlagbehälter. Dieser ist teilweise mit kaltem Wasser gefüllt, in den das Dampf-Wasser-Gemisch dispergiert und kondensiert wird.

Die Temperaturen werden an etlichen Stellen des Kreislaufs mit $1/8''$ NiCrNi-Thermoelementen gemessen. Im Bereich der Teststrecke sind diese Elemente an der Spitze auf einer Länge von 5 mm auf $0,5 \text{ mm}$ Durchmesser verjüngt.

Drucke und Differenzdrucke werden mit Sensotec Druckaufnehmern gemessen. Die Referenzmeßgeräte des Kreislaufs für Dichte und Massenstrom werden anschließend unter 2.2 und 2.3 beschrieben.

Die elektrischen Signale der Testgeräte und der Kreislaufinstrumentierung werden über maximal 76 Analogeingänge und 8 Digitaleingänge von einer PDP11/03 erfaßt und auf Magnetplatten gespeichert. Die Signaleingänge können

in 3 Gruppen mit unterschiedlichen Abfragezeiten unterteilt werden. Im allgemeinen wurden die Drucke mit einem Zeitschritt von 2 ms, die Differenzdrucke und die Testgeräte mit 6 ms und die Temperaturen mit 60 ms abgefragt.

2.2 Referenz-Gamma-Densitometer

Als Referenzdichtemeßgerät ist in die Teststrecke ein serielles 5-Strahl-Gamma-Densitometer, das im KfK-IRB entwickelt wurde, eingebaut. Der LOBI-Meßeinsatz hat ein eigenes Gamma-Densitometer, mit dessen Messung alle Massenstrom-Berechnungen aus den Testgerätesignalen (Kapitel 5) gemacht wurden, zur Überprüfung dient das Referenzdensitometer das außerdem eine Bestimmung der vertikalen Dichteschichtung im horizontalen Rohr, und damit eine gute Beurteilung des Strömungszustandes ermöglicht.

Ein weiteres 6-Strahl-Gamma-Densitometer von KfK-LIT, das ursprünglich zu anderen Messungen eingebaut war, ermöglichte einen weiteren Vergleich der Dichtemeßverfahren.

Abb. 2 zeigt den Aufbau des Referenz-Gamma-Densitometers. Von einer Ir-192 Gamma-Quelle gehen sechs Gammastrahlen aus, von denen fünf fächerförmig den Strömungskanal durchdringen und einer als Referenzstrahl frei passieren kann. Alle sechs Strahlen werden von einer rotierenden Scheibe mit Bogenschlitzen so unterbrochen, daß immer nur ein Strahl den gemeinsamen Plastikszintillator erreichen kann. Auf diese Weise kommt es zu einer seriellen Abfrage der sechs Gammastrahlen. Die Signale werden mit Adressen versehen und digital zum Rechner geleitet. Der Referenzstrahl wird automatisch zur Korrektur von Signaländerungen herangezogen, die nicht von einer Dichteänderung herrühren. Die gefürchteten Drifte, zu denen Fotomultiplier neigen, werden auf diese Weise ausgeglichen. Das Gamma-Densitometer kann durch Auswechseln der Rohr-Kollimator-Kombination sowohl für die Nennweiten 50 als auch 80 verwendet werden. Die detaillierte Beschreibung einer vorausgegangenen Entwicklung gleichen Prinzips für NW 50 wird in [1] durchgeführt.

2.3 Referenz-Massenstrommessung

Das True Mass Flow Meter (TMFM) ist das bisher einzige, bewährte, direkt messende Massenstrommeßgerät. Abb. 3 zeigt das Meßprinzip. In einem Läufer, ähnlich dem einer Kreiselpumpe, wird der Zweiphasenströmung ein definierter

Drall aufgeprägt. Im anschließenden Stator wird durch Umlenkung auf radialen Austritt der Drall wieder auf 0 reduziert und dadurch ein Drehmoment M_a erzeugt. Der Massenstrom ist durch die einfache Beziehung

$$\dot{m} = k \cdot M_a / (r^2 \times \omega) \quad (1)$$

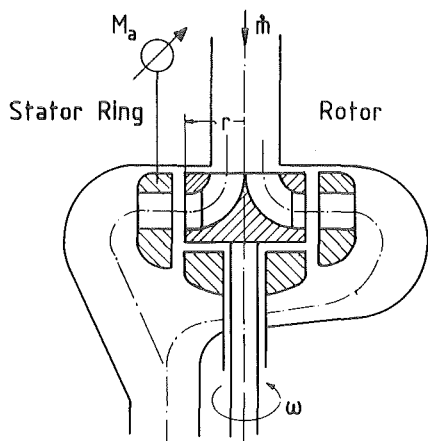


Abb. 3

bestimmbar, wobei M_a das gemessene Drehmoment, r der äußere Laufraddurchmesser, ω die Winkelgeschwindigkeit des Läufers und k ein Kalibrationsfaktor sind. Diese eigens für den behandelten Testkreislauf von KfK-IT [2, 3, 4] entwickelte Version für einen Auslegungsmassenstrom von 50 kg/s wurde in Luft-Wasserströmung im stationären Kreislauf für Zweiphasenmeßtechnik [5,6] des IRB getestet und kalibriert. Es ergab sich ein Meßfehler von unter $\pm 1,5$ % auf 50 kg/s bezogen.

Bei Dampf-Wasser-Strömung im Blowdown trat generell ein etwas höherer Meßfehler auf, der auf temperaturbedingte Drifte der Dehnungsmeßstreifen, die das Stator Drehmoment messen, zurückgeführt wird. Berechnet wurde dieser Fehler durch Massenbilanz zwischen dem Integral des gemessenen TMFM-Massenstromes über der Zeit und der wirklich ausgeströmten Masse aus dem Blowdownbehälter und dem Rohrsystem. Durch ein für alle Blowdowns einheitliches Modell zur Korrektur der gemessenen Massenstromfunktion des TMFM, die im Detail in [10] beschrieben ist, konnte erreicht werden, daß die Massenbilanzen bis auf etwa 3 bis 5 % aufgehen. Dieser Wert kann als mittlerer Meßwertfehler (relat. Fehler) des TMFM in der Datenerfassungszeit angenommen werden. Da der mittlere Massenstrom in dieser Zeitspanne nur etwa 1/4 des TMFM-Auslegungswertes beträgt, ist die mittlere absolute Meßunsicherheit des TMFM für die Blowdownversuche mit ca. 1 % anzusetzen. Das Korrekturmodell berücksichtigt die Randbedingungen (Anfangswert, Endwert) der TMFM-Messung und den Wechsel des Kennlinienverlaufs beim Übergang von einphasiger Strömung bei Blowdownbeginn zur zweiphasigen Strömung (nach den ersten Sekunden). Der so vom Rechner korrigierte Massenstromverlauf wurde als Referenzwert für die später beschriebenen Massenstromberechnungen herangezogen.

3. Versuchsanordnung

Abb. 4 zeigt schematisch die Anordnung der Test- und Referenzinstrumentierung in der waagerechten Teststrecke. Vor dem zu testenden Meßeinsatz von LOBI sind, in Strömungsrichtung gesehen, das IRB 5-Strahl-Densitometer (Referenzgerät) und, nach dem Meßeinsatz, das TMFM angeordnet. In dem Schema sind nur die Temperatur- und Druckaufnehmer eingezeichnet, deren Signale für die Versuchsauswertung herangezogen wurden. Die Position der Gammastrahlen zum Strömungsquerschnitt der 3 Densitometer ist ferner aus dem Schema zu entnehmen. Der LOBI-Meßeinsatz ist ein Rohr von 1 m Länge und 46 mm innerem Durchmesser, das in die Rohrstrecke von 50 mm innerem Durchmesser eingeflanscht war. Der Einsatz enthält, in Strömungsrichtung gesehen, zwei lokal messende Turbinendurchflußmesser (Local-Flow Turbine), eine Dichtemeßvorrichtung (Densitometer), zwei Stauscheiben (Dragbodies) und einen global messenden Turbinendurchflußmesser (Full-Flow Turbine). Die Abb. 5 zeigt ein Foto von der Außenansicht des Meßeinsatzes (oben) und den beiden Vergleichs-Densitometern (unten). Im folgenden werden die Geräte des Einsatzes einzeln beschrieben.

- Die lokalen Turbinendurchflußmesser (QT1, QT2), die von der LOBI-Instrumentierungsgruppe entwickelt wurden, haben Sondenform und werden in Stützen des Strömungskanals montiert. Abb. 6 (unten) zeigt ein Foto der Sonde und Abb. 7 ein Foto des ausgebauten Turbinenläufers. Die Turbinenläufer, die einen Außendurchmesser von ca. 7 mm haben, sind in zwei Radialkugellager mit 3 mm Außendurchmesser und einem kugelförmigen Achsschublager gelagert. Die Drehzahl wird mit Induktivgebern erfaßt. Die verwendeten Turbinen sind für einen Geschwindigkeitsbereich bis 30 m/s ausgelegt; die untere Ansprechgrenze liegt für Wasser bei 4 % und für Gas bei 10 % dieses Wertes. Die Meßunsicherheit liegt bei einphasiger Strömung im Bereich von 6 % des Meßwertes. Wegen der Schichtung bei Zweiphasenströmung im horizontalen Rohr und des damit verbundenen Dichte- und Geschwindigkeitsunterschiedes über den Querschnitt werden zwei Turbinen verwendet, die jeweils im oberen und im unteren Drittel des gleichen Rohrquerschnittes eingebaut sind. Die kleinen Kugellager verlangen eine hohe Wasserreinheit, die im Versuchskreislauf aus ferritischem Material nicht eingehalten werden konnte. Aus diesem Grunde ließ sich bei keinem Blowdownversuch erreichen, daß beide Turbinen während der gesamten Versuchszeit störungsfrei durchliefen.

- Das Zweistrahl-Gamma-Densitometer (DD) der Firma Exatest ist mit einer 20 Ci Cs-137 Quelle ausgerüstet und arbeitet mit Impuls-Zählraten von etwa 1 MHz. Durch eine spezielle Spannungsregelung des Fotomultipliers wird das gemessene Gamma-Spektrum stabilisiert und somit ein Teil der Drift kompensiert. Die von der Meßzeit (Statistik) abhängige Meßunsicherheit liegt in der Regel zwischen 3 und 8 % des Meßsignals. Die Anordnung der beiden Gamma-Strahlen im Strömungsquerschnitt ist aus Abb. 4 zu ersehen.

- Die Dragbodies (QD1, QD2) von Battelle/Frankfurt sind aus einem federnden Hebelarm aus Titan mit einer rechteckigen scharfkantigen Prallplatte aufgebaut, die senkrecht zur Strömungsrichtung steht. Abb. 6 (oben) zeigt ein Foto der Dragbodysonde. Auf dem Hebelarm, der im Strömungsbereich durch eine Schutzhülse abgeschirmt ist, ist eine Dehnungsmeßstreifen-Halbbrücke aufgebracht. Aus den gleichen Gründen wie bei den Turbinensonden sind jeweils zwei Dragbodies im Strömungsquerschnitt angeordnet. Die untersuchten Sonden waren für eine spezifische Impulsflußdichte von 34 N/cm^2 ausgelegt. Trotz Temperaturkompensation leiden die Dehnungsmeßstreifengeber unter temperaturabhängigen Nullpunktsdriften. Durch Nullpunktmessung vor und nach einem Versuch können diese teilweise kompensiert werden. Ohne diesen Fehler, der in der Größenordnung von 2 % liegt, beträgt die Meßunsicherheit des Dragbodies bei Meßbereichen $< 0,1$ etwa 25 % der gemessenen Impulsflußdichte. Im Bereich $> 0,1$ kann die Unsicherheit bis zu 50 % erreichen. Der wesentliche Anteil hierbei liegt in der Unsicherheit des Widerstandskoeffizienten bei Zweiphasenströmung. Da zwischen der Impulsflußdichte und der Strömungsgeschwindigkeit eine quadratische Abhängigkeit besteht, wirken sich die genannten Fehler auf die Massenstrombestimmung mit etwa 12 bis 25 % aus. Systematische Nullpunktmessungen, wie sie bei den LOBI-Versuchen zur Temperaturkorrektur vorgenommen werden, waren bei den beschriebenen Versuchen nicht möglich. Es wurden jedoch, wie im Abschnitt 5.2.4 beschrieben wird, eine nachträgliche Signalkorrektur durchgeführt, die auf einem Vergleich der Meßwerte (Ende Blowdown) des Dragbody und der Full-Flow Turbine basiert.
Ein Dragbody, der bereits im LOBI-Kreislauf bei mehreren Blowdownversuchen eingesetzt war, fiel bei Beginn der Versuche aus, so daß für einen Teil der Tests nur jeweils ein Dragbody Meßwert zur Verfügung stand.

- Die Full-Flow Turbine, QF1 die in Abb. 8 als Foto dargestellt ist, ist eine Entwicklung des CENG (Centre d'Etudes Nucleaires, Grenoble, Frankreich). Sie

ist speziell für Blowdownversuche entwickelt und überdeckt einen großen Geschwindigkeitsmeßbereich. Ihr nominaler Meßbereich ist bis 100 m/s, sie kann jedoch kurzzeitig bis 150 % überlastet werden. Der nutzbare Meßbereich ist bei Verwendung eines induktiven Meßgebers größer als 100 : 1. Die Meßunsicherheit bei stationärer einphasiger Strömung beträgt 2 % des Meßwertes. Im LOBI-Kreislauf wird diese Turbine nur für senkrechte Strömung verwendet, weil bei Zweiphasenströmung die Interpretation des Meßergebnisses bei einer über den Querschnitt unterschiedlichen Geschwindigkeit und Dichteverteilung nicht eindeutig ist. Dieses Gerät lief während aller Versuche einwandfrei ohne Wartung. Die Meßergebnisse lassen jedoch vermuten, daß mit zunehmender Einsatzzeit die Lagerreibung durch den Rostgehalt des Wassers etwas zugenommen hat.

4. Versuchsdurchführung

Die Tab. 1 enthält die wichtigsten Versuchsparameter der auswertbaren Blowdowns, die mit dem LOBI Meßeinsatz durchgeführt wurden. Außer der laufenden Blowdownnummer, die auch für die in Abschn. 5 bis 7 durchgeführten Auswertungen verbindlich ist, wurden Druck und Temperatur unmittelbar vor und nach dem Blowdownbeginn aufgeführt. Der Grad der Unterkühlung im Blowdownkessel ist aus den Druckunterschieden ersichtlich und der Grad der Unterkühlung der Teststrecke gegenüber dem Blowdownkessel aus den Temperaturunterschieden. Für jedes Gerät (Bezeichnung nach Abb. 4) ist in der Tabelle angegeben, ob es funktioniert hat (x) oder ausgefallen bzw. gestört war, sodaß eine Verwertung nicht sinnvoll erschien (0).

Der Durchmesser der Blende, die vor dem Schnellöffnungsventil eingesetzt war, geht auch aus der Tabelle hervor. Die Blende hatte in erster Linie die Aufgabe, den Massenstrom zu begrenzen, um die Testgeräte nicht zu überlasten. Die Blendenöffnung hat natürlich auch einen starken Einfluß auf den Versuchsablauf sowie auf die Strömungsform und die vertikale Dichteverteilung in der Teststrecke während des Blowdowns.

Ein Blowdownversuch wurde auf folgende Weise vorbereitet: Vom Dampfkessel kommend wurde siedendes Wasser (z.T. ein zweiphasiges Gemisch) von unten in den Druckkessel eingespeist und oben wieder abgelassen und zum Kondensator zurückgeführt. Auf diese Weise wurde der Kessel langsam aufgewärmt und dabei der Druck erhöht. Durch die Teststrecke wurde dabei parallel ein kleiner

Bypaßstrom geleitet, um Rohrleitung und Geräte vorzuwärmen. Das TMFM sollte kalt bleiben. Nur bei Leckage im Schnellöffnungsventil kam es auch im TMFM zu Temperatursteigerungen vor dem Blowdown. Der Füllgrad des Druckkessels wurde mit Kraftmeßdosen, in denen er aufgehängt war, verfolgt. Nach Erreichen der gewünschten Temperatur wurde der Teststreckenbypaß, das Ventil am Kessel oben, und später, wenn auch der Druck erreicht war, das Eintrittsventil am Druckkessel unten geschlossen. Während dieses Auffüllvorganges, der je nach Druck 2 bis 3 Stunden dauerte, wurden die Geber für Temperatur, Druck und die der Meßgeräte überprüft und bei starker Nullpunktabweichung justiert. Kurz vor dem Blowdownstart wurden das Gamma-Densitometer, das TMFM und Pumpen eingeschaltet. Der Blowdownversuch begann mit der Datenerfassung etwa 2,5 s vor dem Start der automatischen Öffnung des Schnellöffnungsventils. Auf diese Weise ist für alle Geber der Zustand vor dem Blowdown und vor allem sind die Eichwerte für die Densitometer mit aufgezeichnet. Fast für alle Blowdowns wurde eine Datenerfassungszeit von 80 s gewählt. Etwa 5 Minuten nach dem Start des Blowdowns wurde eine zweite Datenerfassung von 5 sec durch den Rechner durchgeführt. Der Druck war bis dahin in der Teststrecke, die nur noch mit Dampf gefüllt war, fast auf Atmosphärendruck abgefallen. Diese Nachblowdownwerte waren vor allem dazu notwendig, um für die Gamma-Densitometer die Zählrate bei reinem Dampf aufzunehmen, was in Abschn. 5.1 behandelt wird.

An einem Tag konnten normalerweise 2 Blowdownversuche gefahren werden.

5. Auswertung der Versuchsergebnisse

Die vom Versuch gelieferten Meßsignale wurden mit einem besonderen Rechenprogramm (NEFF) von der PDP 11/03 seriell erfaßt, in physikalische Werte umgewandelt und auf Platten magnetisch gespeichert. Beim Umwandeln können lineare Korrekturfunktionen (Drucke, Testinstrumentierung) und nichtlineare Funktionen (Thermoelemente) sowie vorher eingegebene Nullpunktlagen berücksichtigt werden. Echte Drifte des Nullpunktes bzw. des Verstärkungsfaktors der Rechner-Eingangsverstärker wurden auch korrigiert, wenn vor der Meßwertfassung ein entsprechender Verstärkerabgleich durchgeführt wurde. Die Meßsignale wurden, nach 3 Gruppen sortiert, mit unterschiedlichen Zeiten abgefragt.

Mit Hilfe eines Umwandlungsprogrammes (PDP-IBM) wurden diese aufbereiteten Daten in IBM-kompatible Form übersetzt, auf Band gespeichert und in der Großrechenanlage der KfK weiterverarbeitet und am Ende ausgeplottet und gedruckt.

Als erster Schritt wurden dort die seriell erfaßten Werte mit unterschiedlichem Zeitschritt in zeitsynchrone Wertereihen mit gleichem Zeitschritt durch Interpolation umgewandelt. Die auf diese Weise erhaltene Datenflut (ca. 40000 Werte je Kanal) wurde dann in der Regel nach Integration (0,2 sec) auf ca. 2000 Daten je Kanal, bei einer Versuchsdauer von 80 s, reduziert.

Im folgenden wird auf die programmtechnische Seite der Datenweiterverarbeitung nicht weiter eingegangen, sondern nur die physikalische Bestimmung der Dichten und der Massenströme und der Vergleich mit ihren Referenzwerten behandelt.

5.1 Berechnung der Dichte der Zweiphasenströmung

Die Absorption von Gammastrahlen beim Durchdringen des strömenden Mediums im Strömungskanal ist die Grundlage für die Dichtebestimmung des Zweiphasengemisches. Nach dem bekannten Absorptionsgesetz für energiereiche Strahlung verändert sich die Intensität (Zählrate) eines Gammastrahles nach Durchdringen des Fluids und der Kanalwände.

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-(\mu_{Fl} \cdot L_{Fl} \cdot \rho_{Fl} + \mu_w \cdot L_w \cdot \rho_w)} \quad (2)$$

- I_1 Zählrate des geschwächten Strahls
 I_0 Zählrate des ungeschwächten Strahls
 $\mu_{Fl,w}$ Absorptionskoeffizient vom Fluid (Fl) und Wandmaterial (w)
 $L_{Fl,w}$ gesamte Durchdringungslänge im Fluid bzw. der Wände
 $\rho_{Fl,w}$ Dichte des Fluids bzw. des Wandmaterials

Bei einem Gammadensitometer, bei dem die Stoffgrößen μ und ρ für Wandmaterial, Wasser und Gas und die geometrischen Abmessungen L konstant sind, kann man durch Relativmessung diese Größen eliminieren. In [1] ist eine detaillierte Beschreibung dieser bekannten Methode zu finden.

Durch Messung der Zählrate I_F bei mit Flüssigkeit (Wasser) gefülltem Kanal und I_G bei Füllung mit Gas (Dampf) kann man aus der Zählrate I der zweiphasigen Messung mit der folgenden Beziehung direkt den Dampfvolumenteil α des Zweiphasengemisches bestimmen.

$$\alpha = \frac{\ln(I/I_F)}{\ln(I_G/I_F)} \quad (3)$$

Diese Formel gilt nur für konstanten Druck und konstante Temperatur und für den Bereich des enggebündelten Gammastrahles.

Für instationäre Verhältnisse (Blowdown), wo die Wassermessung vor dem Blowdown bei hohem Druck und die Dampfmessung nach dem Blowdown bei niedrigem Druck durchgeführt wird, müssen in die Beziehung für α der Druck p und die Temperatur t bzw. die Dichten ρ_F und ρ_G für Wasser und Dampf eingeführt werden.

Für Mehrstrahlgammadensitometer lautet nun die Gl. 3 beim Druck p und für Strahl i :

$$\alpha = \frac{\ln I_{Pi} - \ln I_{FiP}}{\ln I_{GiP} - \ln I_{FiP}} \quad (4)$$

Aus der allgemeinen Absorptionsgleichung ergibt sich ferner:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot L \cdot \rho_1} \quad (5)$$

$$I_2 = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot L \cdot \rho_2} \quad (6)$$

$$\mu \cdot L = \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{\rho_2 - \rho_1} \quad (7)$$

oder angewandt auf Gl. 4

$$\mu \cdot L = \frac{\ln I_{GiP} - \ln I_{FiP}}{\rho_{FP} - \rho_{GP}} = \frac{\ln I_{Gim} - \ln I_{Fim}}{\rho_{Fm} - \rho_{Gm}} \quad (8)$$

$$\ln I_{GiP} - \ln I_{FiP} = (\ln I_{Gim} - \ln I_{Fim}) \frac{\rho_{FP} - \rho_{GP}}{\rho_{Fm} - \rho_{Gm}} \quad (9)$$

hier sind:

I_{GiP} = Zählrate bei Dampffüllung, Druck p , Siedetemperatur, Strahl;

I_{FiP} = Zählrate bei Wasserfüllung, Druck p , Siedetemperatur, Strahl;

ρ_{GP} = Dichte des Dampfes bei Druck p , Siedetemperatur

ρ_{FP} = Dichte des Wassers bei Druck p , Siedetemperatur

I_{Gim} = gemittelte Zählrate für Dampf, nach Blowdown gemessen

I_{Fim} = gemittelte Zählrate für Wasser, vor Blowdown gemessen

ρ_{Gm} = Dichte des Dampfes nach Blowdown [f(p)]

ρ_{Fm} = Dichte des Wassers vor Blowdownbeginn [f(t)]

Aus der Kombination der Gleichungen 4 und 9 ergibt sich die Formel für den Dampfvolumenteil bei transientem Zustand (während des Blowdowns), für den Einzelstrahl i beim Druck p

$$\alpha_{iP} = \frac{\ln I_{iP} - \ln I_{Fim} + (\ln I_{Gim} - \ln I_{Fim}) \left[\frac{\rho_{FP} - \rho_{Fm}}{\rho_{Fm} - \rho_{Gm}} \right]}{(\ln I_{Gim} - \ln I_{Fim}) \left[\frac{\rho_{FP} - \rho_{GP}}{\rho_{Fm} - \rho_{Gm}} \right]} \quad (10)$$

und daraus die Zweiphasendichte des Einzelstrahls i (beim Druck p):

$$\rho_{iP} = \alpha_{iP} \cdot \rho_{GP} + (1 - \alpha_{iP}) \rho_{FP} \quad (11)$$

Aus ρ_{iP} läßt sich nach dem Prinzip der Wichtung mit den einzelnen Gammastrahllängen der Mittelwert für den gesamten Strömungsquerschnitt nach den folgenden Beziehungen errechnen:

$$\alpha_g = \frac{\sum_1^i \alpha_{iP} \cdot L_i}{\sum_1^i L_i} \quad (12)$$

und daraus die mittlere Dichte für den Querschnitt.

$$\rho_g = \alpha_g \cdot \rho_{GP} + (1 - \alpha_g) \rho_{FP} \quad (13)$$

Für das Ispra-Gammadensitometer betragen die nominalen Strahllängen

$$l_1 = 46 \text{ mm}$$

$$l_2 = 34 \text{ mm}$$

Während sich mit den Gleichungen 10 und 11 die Werte α_p und ρ_p für das LOBI 2-Strahl-Densitometer und das LIT 6-Strahl-Densitometer berechnen lassen, werden beim IRB 5-Strahl-Densitometer die Zählraten der 5 Gammastrahlen mit dem Wert des Referenzstrahles in der folgenden Weise normiert und damit entsprechend korrigiert. Hat der Referenzstrahl den Index o so wird aus Gl. 4

$$\alpha_{iP} = \frac{\ln(I_{iP}/I_{OP}) - \ln(I_{FiP}/I_{FOP})}{\ln(I_{GiP}/I_{GOP}) - \ln(I_{FiP}/I_{FOP})} \quad (14)$$

und aus Gl. 10 wird

$$\alpha_{iP} = \frac{\ln(I_{iP}/I_{eP}) + \ln \left[\frac{I_{Gim}/I_{Gom} \cdot (I_{Fom}/I_{Fim})}{\ln \left[\frac{I_{Gim}/I_{Gom} \cdot (I_{Fom}/I_{Fim}) \right]} \right] \cdot \left[\frac{\rho_{FP} - \rho_{FM}}{\rho_{FM} - \rho_{GM}} \right] - \ln(I_{Fim}/I_{Fom})}{\ln \left[\frac{I_{Gim}/I_{Gom} \cdot (I_{Fom}/I_{Fim})}{\ln \left[\frac{I_{Gim}/I_{Gom} \cdot (I_{Fom}/I_{Fim}) \right]} \right] \cdot \left[\frac{\rho_{FP} - \rho_{GP}}{\rho_{FM} - \rho_{GM}} \right]} \quad (15)$$

Die Werte für die Einzelstrahldichten und Mittelwerte werden entsprechend Gl. 11, 12, 13 für die 5 Strahlen gebildet.

Mit diesen Gleichungen wurden die Referenzdichtewerte berechnet. Sie dienen nicht nur als Vergleich zu den LOBI-Dichtewerten sondern, da in horizontaler Position gemessen wurde, auch der Bestimmung der senkrechten Dichteverteilung im Rohr, die einen wesentlichen Aufschluß über die Strömungsform gibt.

Nach Auswertung der Meßsignale der Densitometer ergaben sich am Blowdownende beim Referenzdensitometer für α und ρ die zu erwartenden Werte von 1 bzw. 0. Die beiden anderen Dichtemeßgeräte zeigten Abweichungen, die eine Korrektur der Endzählraten I_{Gim} und I_{Fim} um den Faktor 1.008 beim LOBI-Densitometer und um den Faktor 1.012 beim LIT-Densitometer erforderten. Tatsächlich ließ sich innerhalb der 5 Minuten Aufzeichnungsdauer nach Blowdownende in allen drei Geräten eine leichte Zählratendrift nachweisen, für die Fotomultiplier oder Temperatureinflüsse verantwortlich sein können. Beim Referenzdensitometer wurde diese Drift offensichtlich durch den Bezug auf den Referenzstrahl einwandfrei kompensiert. Das LOBI-Densitometer besitzt eine elektrische Driftkompensation für den Fotomultiplier-Effekt; mögliche Temperatureinflüsse sind in der Fehlerabschätzung nicht berücksichtigt.

5.2 Massenstromberechnung

Für die Berechnung der Massenströme aus den Meßsignalen der LOBI-Meßstrecken-instrumentierung wurden die einfachen Modelle benutzt, die definitionsgemäß für einphasige Strömung bzw. für homogene zweiphasige Strömung ohne Schlupf gelten. Es wurde dabei davon ausgegangen, daß die Signale der einzelnen Geräte, in physikalische Einheiten umgerechnet, folgendes darstellen:

$$\text{Drag Bodies} \quad : \quad QD_{1,2} = C_1 \cdot \rho \cdot u^2 \quad [\text{N}] \text{ Impulsfluß} \quad (16)$$

$$\text{Turbinen Messer} \quad : \quad QT_{1,2} \cdot u \cdot QF_1 = C_2 \cdot u \quad [\text{m/s}] \text{ Geschwindigkeit} \quad (17)$$

$$\text{Gamma-Densitometer} \quad : \quad DD = \rho_g \quad [\text{kg/m}^3] \text{ Dichte} \quad (18)$$

dabei ist:

u die querschnittsgemittelte Geschwindigkeit im unverengten Kanalquerschnitt.

ρ, ρ_g die querschnittsgemittelte Dichte

$L_{1,2}$ die Gammastrahllängen des LOBI-Densitometers

$C_{1,2}$ die Gerätekonstanten, die auch den Widerstandskoeffizienten des Drag Bodies und die Querschnittsverengungen aller Geräte beinhalten.

Durch entsprechende Kombination der Meßwerte läßt sich der Massenstrom auf die folgende Weise berechnen:

$$\text{Drag Body + Densitometer } \dot{m}_{\text{QD,DD}} = K_1 \cdot (\text{QD} \cdot \text{DD})^{1/2} \quad (20)$$

$$\text{Turbinen + Densitometer } \dot{m}_{\text{QT,DD}} = K_2 \cdot (\text{QT} \cdot \text{DD}) \quad (21)$$

$$\text{Dragbody + Turbinen } \dot{m}_{\text{QD,QT}} = K_3 \cdot (\text{QD}/\text{QT}) \quad (22)$$

QT steht hier auch für QF

Es sind: K_i Umrechnungsfaktoren in denen auch der Rohrquerschnitt enthalten ist. Sie werden in 5.2.1 - 5.2.3 näher definiert.

Da in der Meßstrecke 2 Dragbodies, 2 Local- und eine Full-Flow Turbine vorhanden sind, lassen sich nach den aufgezeigten Modellen eine Reihe von Kombinationen aufstellen.

QD1, DD QD2, DD

QT1, DD QT2, DD

QF1, DD

QD1, QF1 QD2, QF1

QD1, QT1 QD2, QT2

Wie aus Abb. 4 hervorgeht, ist dabei

QD1 der untere Dragbody

QD2 der obere Dragbody

QT1 die untere Local-Flow Turbine

QT2 die obere Local-Flow Turbine

QF1 die Full-Flow Turbine
 DD das Gamma Densitometer

Im folgenden werden die für die Massenstromauswertung verwendeten numerischen Gleichungen definiert:

5.2.1 Dragbody und Gammadensitometer

Der mit einem Dragbody gemessene Impulsfluß (Schleppkraft) ist:

$$QD = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2 \cdot \rho}{f_b} \cdot A_{DB} \quad (23)$$

u Geschwindigkeit im unverengten Querschnitt

$f_b = \frac{A_b}{A_R}$ Verengungsfaktor

A_b verengter Rohrquerschnitt

A_R $1,66914 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ Rohrquerschnitt (LOBI-Rohr)

A_{DB} Fläche der Prallplatte

c_w Widerstandskoeffizient (Wert für verwendete Instrumente)

Damit erhält man als Berechnungsgleichung für den Massenstrom nach Gl. 16 und 20:

$$\dot{m}_{QD, DD} = A_R \cdot f_b \left(\frac{2}{1,2 \cdot A_{DB}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (QD \cdot DD)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

Da einige Meßgeräte im Verlauf der Untersuchung mit gleichen oder ähnlichen Typen ausgetauscht wurden, wurden in Tab. 2 die bei den einzelnen Versuchen eingesetzten Typen zusammengestellt. Die Gerätefaktoren A_{DB} , f_b und der Gleichungsfaktor

$$K = A_R \cdot f_b \cdot \left(\frac{2}{1,2 \cdot A_{DB}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

sind ebenfalls in der Tabelle numerisch enthalten.

5.2.2 Turbinen-Gammadensitometer

Die von den Turbinen gemessenen Geschwindigkeiten im verengten Querschnitt sind:

$$QT = u \cdot f_b \quad \text{für die Local-Flow Turbinen} \quad (26)$$

$$\text{bzw. } QF = u \cdot f_b \quad \text{für die Full-Flow Turbine} \quad (27)$$

und die zusammen mit der Dichte des LOBI-Densitometers errechneten Massenstromwerte sind:

$$\dot{m}_{QT,DD} = A_R \cdot f_b \cdot QT \cdot DD \quad (28)$$

$$\text{und } \dot{m}_{QF,DD} = A_R \cdot f_b \cdot QF \cdot DD \quad (29)$$

Die Verengungsfaktoren f_b , die für jedes Gerät (bzw. Gerätepaarung) einen anderen Wert haben, sind wiederum aus Tab. 2 zu entnehmen.

Der Faktor K ist:

$$K = A_R \cdot f_b \quad (30)$$

5.2.3 Turbinen und Dragbody

Aus den Gleichungen 23, 26 und 27 ergeben sich die Gleichungen für den Massenstrom:

$$\dot{m}_{QD,QT} = A_R \cdot \frac{2}{1,2 \cdot A_{DB}} \cdot \frac{f_{bDB}^2}{f_{bT}} \cdot QD/QT \quad (31)$$

$$\text{bzw. } \dot{m}_{QD,QF} = A_R \cdot \frac{2}{1,2 \cdot A_{DB}} \cdot \frac{f_{bDB}^2}{f_{bF}} \cdot QD/QF \quad (32)$$

und die Faktoren K:

$$K = A_R \cdot \frac{2}{1,2 \cdot A_{DB}} \cdot \frac{f_{bDB}^2}{f_{bT}} \quad (33)$$

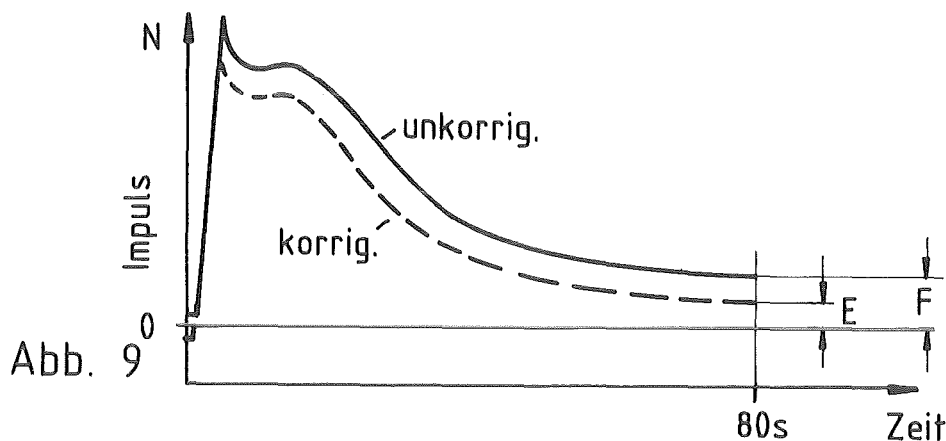
$$\text{bzw. } K = A_R \cdot \frac{2}{1,2 \cdot A_{DB}} \cdot \frac{f_{bDB}^2}{f_{bF}} \quad (34)$$

Die Werte für A_{DB} , f_{bDB} , f_{bT} , f_{bF} (Verengungsfaktoren für Dragbodies, Local-Flow Turbinen und Full-Flow Turbinen) sind wiederum in Tab. 2 enthalten.

5.2.4 Nullpunktkorrektur des Dragbody Meßwertes

Wie bereits im Abschnitt 3 erwähnt wurde, neigen die Dragbodies unter der Blowdown-Transiente zu Nullpunktsdriften. Da dieser Effekt vermutlich in der Phase höchster Belastung direkt nach dem Blowdownbeginn hauptsächlich verursacht wird, ist es zweckmäßig, den Kurventeil des Dragbody Signals hinter diesem Maximalpunkt, und zwar orientiert auf das Ende des Blowdowns, zu korrigieren. In dieser Endphase des Blowdowns, in der fast reine Dampfströmung vorliegt, gibt das Signal der Full-Flow Turbine am zuverlässigsten die Strömungsgeschwindigkeit an. Deshalb wurde der aus der Kombination QF1, DD berechnete Massenstrom zur Korrektur des Dragbody Signals in der folgenden Weise verwendet.

Abb. 9 zeigt schematisch das QD-Signal



- Abb. 9
- die gesamte Kurve wurde durch Subtrahieren des Betrages F verschoben, so daß das Signal bei 80 sec den Betrag 0 hat.
 - Aus dem mit Gleichung 29 gewonnenen Massenstrom bei 80 sec wird in der folgenden Weise der Signalwert E berechnet, der zur Kurve addiert wird.

Aus der Annahme, daß bei 80 s gilt:

$$\dot{m}_{QF1,DD} = \dot{m}_{QD,DD}$$

erhält man aus Gleichung 24, 25 und 29:

$$E = QD_{80} = \frac{(\dot{m}_{QF1,DD})^2}{K_{DB} \cdot DD} \Bigg|_{80} \quad (35)$$

Hierfür wurden die Meßwerte zwischen 78 und 80 s genommen und gemittelt. Daraus ergibt sich:

$$E = 28,2434 \cdot \frac{(\dot{m}_{GE4,DD})^2}{DD} \Bigg|_{80} \quad \text{für BLW 019 - 027} \quad (36)$$

$$E = 15,981 \cdot \frac{(\dot{m}_{GE4,DD})^2}{DD} \Bigg|_{80} \quad \text{für BLW 029 - 033} \quad (37)$$

6. Darstellung der Versuchsergebnisse

Der Darstellung der Meßwerte und Versuchsergebnisse wurde relativ viel Platz eingeräumt, um eine gute Beurteilung der Versuchsbedingungen und auch eine eventuelle nachträgliche Interpretation des Verhaltens der einzelnen Meßgeräte zu ermöglichen. Alle wichtigen Werte wurden graphisch über der Blowdownerfassungszeit von 80 s dargestellt, und zwar so, daß sie für die 10 ausgewerteten Blowdowns auf einer Seite in der gleichen Reihenfolge mit Angabe der Blowdownnummer aufgeführt sind. Auf eine zahlenmäßige Darstellung von Versuchsergebnissen wurde verzichtet. Abb. 10 bis 16 enthalten die Grundwerte der Teststrecke wie Drücke (einzeln- und längsgemittelt), Temperaturen (längsgemittelt) Dampf- und Wasserdichte (gemittelt). Ferner sind der korrigierte Referenzmassenstrom des TMFM und die Messungen des 5-Strahl-Referenz-Densitometers dargestellt. Es wurden die 5 Liniendichten ($\rho_1 - \rho_5$) im Bereich der 5-Gamma-Strahlen, die 5 Dampfvolumentanteile ($\alpha_1 - \alpha_5$) und die jeweils querschnittsgemittelten Werte $\bar{\rho}$ und $\bar{\alpha}$ dargestellt. Durch die Darstellung der Liniendichten bzw. der Liniendampfvolumentanteile ist der Grad der Schichtung der Zweiphasenströmung in vertikaler Richtung zu erkennen. Zusammen mit der Schwankung der Werte im zeitlichen Verlauf, vermittelt das einen Einblick in die jeweils vorherrschende Strömungsform.

Abb. 17 bis 22 enthalten die in physikalische Einheiten umgerechneten direkten Meßwerte der 6 LOBI-Instrumente. Bei den beiden Dragbodies sind jeweils der unkorrigierte und der korrigierte Wert (s. 5.2.4) zusammen in einem Diagramm. Im Interesse der übersichtlichen Darstellung wurden auch die Aufzeichnungen der Instrumente, die aus irgendeinem Grund bei dem Blowdown versagt

haben und nicht ausgewertet wurden (s. Tab. 1), mit aufgeführt. Sie enthalten den Vermerk "gestört".

Abb. 23 bis 29 stellen die nach den Gleichungen 20 bis 22 errechneten Massenströme dar. Sie enthalten die Kombinationen QT1,DD; QT2,DD, QD1,DD; QD2,DD; QF1,DD; QD1,QF1; QD2,QF1; QD1,QT1 und QD2,QT2. Da die Instrumente, aus deren Signalen der Massenstrom errechnet wurde, voneinander einen maximalen axialen Abstand von 0,5 m haben und deshalb annähernd zeitsynchron arbeiten, können die zeitlichen Massenstromschwankungen der Diagramme als echt angesehen werden, zumal die zeitliche Auflösung der Meßwerte durch Integration, mit einem Zeitschritt von 0,2 s geglättet und auf 1/25 der Meßwertzahl reduziert wurde. Die aus "gestörten" Signalen errechneten Massenstromdiagramme tragen ebenfalls den Vermerk "gestört". Im folgenden werden die Massenströme mit dem Referenzwert verglichen.

6.1 Massenstromvergleich mit dem Referenzwert

Der Vergleich, der aus den Meßwerten errechneten Massenströme, wird auf 2 Arten durchgeführt, wie aus a) und b) hervorgeht.

$$a) \text{ Massenstromverhältnis} = \frac{\dot{m}_{LOBI}}{\dot{m}_{TMFM}}$$

Hierdurch wird die Abweichung des "Meßwertes" vom aktuellen Referenzwert, also ein relativer Fehler, gezeigt. Dieser an sich sehr kritische Vergleich ergibt verständlicherweise bei sehr kleinen Referenzwerten, die zum Ende des Blowdowns auftraten, keine vernünftigen Werte mehr. In Abb. 30 bis 34 wurden diese Verhältnisse der Massenströme für die unter 6. aufgeführten Kombinationen bis zu einem unteren Wert von 10 % (5 kg/s) des TMFM-Auslegungswertes (50 kg/s) über der Zeit aufgetragen. Leider sind die Massenstromwerte zum Referenzwert nicht mehr ganz zeitsynchron, da das TMFM ca. 5 bis 6 m stromab von der LOBI-Instrumentierung liegt. Bei einer mittleren Zweiphasengeschwindigkeit von 20 bis 40 m/s (s. Abb. 22) können sich zeitliche Verzögerungen von etwa 0,1 bis 0,3 sec entsprechend in der Meßwertaufnahme ergeben. Die Vergleichskurven wurden daher mit einem Zeitschritt von 2 s integriert und geglättet. In den Bereichen sehr starker Massenstromtransienten, wie beim Blowdownstart und beim Übergang zweiphasiger Strömung in Dampfströmung (s. Abb. 13), macht sich diese Zeitverzögerung durch höhere Abweichungen in den Vergleichskurven bemerkbar.

$$b) \text{ absoluter Massenstromfehler} = \frac{\dot{m}_{\text{LOBI}} - \dot{m}_{\text{TMFM}}}{\dot{m}_{\text{TMFM}_{\text{max}}}} \cdot 100 [\%] \quad (38)$$

$$\dot{m}_{\text{TMFM}_{\text{max}}} = 50 \text{ [kg/s]}$$

Diese Darstellung entspricht der allgemeinen Klassifizierung von Meßgeräten. Die absolute Meßwertabweichung wird ins Verhältnis zum maximalen Meßwert gesetzt. Da für die LOBI Geräte der maximale Meßwert nicht eindeutig in Massenstrom angegeben werden kann, wurde der Auslegungswert des TMFM von 50 kg/s zugrundegelegt. Die in Abb. 35 bis 43 dargestellten absoluten Fehler werden wie erwartet mit abnehmendem Massenstrom kleiner. Es konnten die Kurven deshalb für die ganze Blowdownzeit dargestellt werden.

In den genannten Abbn. 30 bis 43 wurden die Massenstromvergleiche nach a) und b) für jeweils eine Gerätekombination mit der Blowdownnummer als Parameter dargestellt. In Abb. 46 bis 55 wurden alle Gerätekombinationen für je eine Blowdownnummer auf einem Blatt dargestellt, jedoch nur für den Fall a).

6.2 Dichtevergleich zwischen den Gamma-Densitometern

Obwohl von der Aufgabenstellung her die Massenstrombestimmung mit der LOBI-Instrumentierung zu testen war, aber kein Test einzelner Geräte geplant war, ist ein Vergleich des LOBI 2-Strahl-Densitometers mit dem 5-Strahl-Referenzdensitometer (IRB) durchgeführt worden. Zur Bestätigung der Genauigkeit des Referenzdensitometers wurde dieses wiederum mit einem 6-Strahl (2x3-Strahl) Densitometer (LIT) verglichen.

Die Differenzen $\rho_{2 \text{ Strahl}} - \rho_{5 \text{ Strahl}}$ sind für alle Blowdowns in Abb. 44 und die Differenzen $\rho_{6 \text{ Strahl}} - \rho_{5 \text{ Strahl}}$ in Abb. 45 dargestellt. Es ist zu sehen, daß das LOBI-Densitometer gegenüber dem Referenzgerät in der Hauptphase des Blowdowns im Schnitt zwischen 50 und 100 kg/m³ weniger mißt. Die Abweichung des Referenzgerätes zum 6-Strahl-Gerät ist gering und beträgt im Schnitt nur ca. 20 kg/m³, und zwar zur positiven Richtung.

Eine Analyse dieser Meßunterschiede hat ergeben, daß die Dichteänderung, die aufgrund des Druckabfalls in Strömungsrichtung auftritt, mit guter Annäherung diesen Unterschieden entspricht. Die verhältnismäßig große Dichteabnahme zwischen dem Referenz- und dem LOBI-Densitometer ist auf den relativ großen Druckabfall an den Turbinendurchflußmessern QT1 und QT2 zurückzuführen. Bei

der Analyse wurde der Einfluß der Expansion und des Phasenwechsels auf die Dichteänderung berücksichtigt.

7. Interpretation der Ergebnisse

Für die Abweichungen der mit der LOBI-Instrumentierung ermittelten Massenströme von den Referenzwerten kommen prinzipiell drei Ursachen in Betracht:

- Meßfehler der Geräte
- Unzulänglichkeiten der Massenstrom-Berechnungsmodelle
- Meßfehler der Referenzinstrumentierung.

Die Fehlerbandbreite der LOBI-Geräte für stationäre einphasige Strömung ist aus systematischen Untersuchungen, z.B. Ref. /11/ und /12/, bekannt. Typische Werte sind in der Tabelle 5 zusammengefaßt. Diese Fehler sind auf Meßwerte bezogen (relative Fehler). Hierbei wurde zur Vereinfachung der Blowdown-Versuchssablauf in zwei Bereiche aufgeteilt, vgl. hierzu Abb. 12 und 13:

Bereich I: etwa erste Hälfte der Versuchsdauer, bei der ausgeprägte Schichtung mit Massenstromwerten von etwa 10 - 20 kg/s vorherrscht

Bereich II: etwa die zweite Hälfte der Versuchsdauer, die hauptsächlich durch Dampfströmung mit Massenstromwerten im Bereich von etwa 1 kg/s gekennzeichnet ist.

	Bereich I	Bereich II	Gerät
$\epsilon_{(DD)}$	0,08	0,03	Gammadensitometer
$\epsilon_{(QT)}$	0,06	0,06	Local-Flow Turbinemeter
$\epsilon_{(QF)}$	0,02	0,02 ($< 0,17$)	Full-Flow Turbinemeter
$\epsilon_{(QD)}$	0,25	0,48	Dragbody

Tab. 5 relative Fehler der Einzelgeräte in einph. Strömung

Aus diesen Einzelmeßfehlern der LOBI-Geräte lassen sich die Mindestwerte der zu erwartenden Massenstrommeßfehler für einphasige stationäre Strömung abschätzen. Die Tabelle 6 zeigt diese unter Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes und der beschriebenen Modelle abgeschätzten Massenstromfehler.

	Bereich I	Bereich II	Geräte-Kombinationen
μ (QD/DD)	0,18	0,26	Dragbody/Densitometer
μ (QT/DD)	0,14	0,1	Local-Flow Turbinemeter/ Densitometer
μ (QF/DD)	0,1 (< 0,25)	0,05	Full-Flow Turbinemeter/ Densitometer
μ (QD/QT)	0,25 (< 0,44)	0,25 (< 0,5)	Dragbody/Local-Flow Turbinemeter
μ (QD/QF)	0,33	0,25 (< 0,54)	Dragbody/Full-Flow Turbinemeter

Tabelle 6: Relative Massenstromfehler μ in einphasiger Strömung.

Diese Werte sollen bei der Beurteilung der Fehler, die als Ergebnis der Blowdownversuche gefunden wurden, helfen. Vor allem sollen sie den Anteil der Modellfehler an den Gesamtfehlern abschätzen lassen.

In den Abbildungen 30 bis 34 wurden die Verhältnisse der Massenströme zu den Referenzwerten für mehrere Gerätekombinationen als das wichtigste Ergebnis der Blowdownversuche aufgetragen. Wie bereits im Abschnitt 6.1.a beschrieben wurde, ist dabei als untere Grenze der Massenströme 10 % (5 kg/s) des TMFM-Auslegungswertes festgelegt worden. In dem Bereich, in dem der wesentliche Teil des Blowdown abläuft (10-100 %), beträgt der relative Fehler der Referenzmessung im Mittel 3 % vom Meßwert (Abschnitt 2.3) und ist damit bei diesen Fehlerbetrachtungen vernachlässigbar.

Für die Verhältniskurven wurden die Einhüllenden gezeichnet, die alle Werte im genannten Bereich einschließen, mit Ausnahme der Abweichungen im Bereich der starken Transienten beim Blowdownstart (bei ca. 4 s) und beim Übergang zur Dampfströmung (bei ca. 35 s). Durch die geringe Zeitverschiebung, die zwischen der Meßwertaufnahme der Testgeräte und des Referenzgerätes vorhanden ist, entsteht ein zusätzlicher Fehler, der sich jedoch nur bei den starken Transienten auswirkt.

Die Einhüllenden grenzen für jede Gerätekombination das Feld ab, in dem die Verhältnisse zum Referenzmassenstrom für alle durchgeführten Versuche liegen. Ginge man davon aus, daß die durchgeführten Blowdownversuche alle in entsprechenden Versuchskreisläufen möglichen Strömungsformen abdecken, könnte man den Mittelwert der Abweichungen vom Referenzwert als mittleren Systemfehler bezeichnen und damit das jeweils verwendete Modell korrigieren. Diese Annahme trifft nicht ganz zu, weil der Versuchskreislauf im Aufbau sich von großen Versuchskreisläufen unterscheidet und damit auch nicht das gleiche Blowdownverhalten zeigt, was auch im Hinblick auf den LOBI-Kreislauf zutrifft. Bei der Durchführung der Versuche wurde jedoch darauf geachtet, durch Variationen vom Eintrittsdruck, der Unterkühlung und der Austrittsblende ein großes Spektrum von Zweiphasenströmungsformen zu durchfahren, was auch bei der Betrachtung von Abb.13 oder 15 aus den stark unterschiedlichen Formen der Strömungsseparationen zu entnehmen ist. Die Mittelwerte zwischen den Einhüllenden wurden daher aus gutem Grund als konstante Korrekturfaktoren für die verwendeten Modelle eingeführt. Nach Division der jeweiligen Berechnungsgleichungen durch diesen Korrekturwert ergibt sich der durch die Einhüllenden begrenzte Bereich als relativer Meßfehlerbereich dieser Gerätekombination.

In Tabelle 3 sind für 9 Gerätekombinationen diese Werte zusammengetragen. Es wurde außerdem die Verfügbarkeit der jeweiligen Kombinationen bei den 10 Versuchen angegeben.

Vergleicht man diese gemessenen relativen Fehlerbandbreiten mit den abgeschätzten einphasigen Massenstromfehlern (Tab. 6), so erkennt man für die Dragbody-Kombination keine wesentliche Abweichung. Der Vergleich der Turbinenmeterkombination (QT,DD und QF,DD) zeigt dagegen größere Abweichungen, die dem Einfluß der Zweiphasenströmung bzw. der Unzulänglichkeit der verwendeten Modelle zuzuschreiben sind.

Eine Verbesserung eines Modells setzt in diesem Fall voraus, daß es gelingt, den Einfluß eines Zweiphasenparameters, der nicht in den Modellen enthalten ist, zu kennen!

Charakteristische Parameter der Zweiphasenströmung sind Phasenseparation und der damit verbundene Phasenschlupf. Informationen über die Phasenseparation und entsprechende Dichteverteilung über den Strömungsquerschnitt können aus den Messungen des Referenzdensitometers abgeleitet werden. Aus dem Verlauf der Liniendichten, Abb. 13, bzw. der entsprechenden Dampfvolumentanteile, Abb. 15, kann man schließen, daß, wie zu erwarten, bei den Versuchen in der horizontalen Meßstrecke eine mehr oder weniger starke, vertikale Dichteschichtung auftrat.

Über den Phasenschlupf standen keine eindeutigen experimentellen Informationen zur Verfügung. Zum Beispiel hätten die beiden lokalen Turbinen bei Versuchen mit starker Schichtung einen vorhandenen Phasenschlupf deutlich anzeigen müssen. Jedoch war es - wie schon erwähnt - nicht gelungen, bei diesen Versuchen von beiden Geräten gleichzeitig ungestörte Messungen zu erhalten. Aus den Ergebnissen in Abb. 31 bzw. 37 und 38 lassen sich deshalb keine eindeutigen Schlüsse ziehen.

Auch aus den Ergebnissen (s. Abb. 30) der Dragbodies, der anderen lokal messenden Instrumentierung, lassen sich über möglichen Schlupf keine eindeutigen Aussagen gewinnen, da sich der Einfluß der Geschwindigkeit der Dichteschichtung überlagert.

Eine ausgeprägte Dichteschichtung muß andererseits nicht an großen Phasenschlupf gekoppelt sein. Bei den Versuchen 026 und 027 mit sehr starker Schichtung, s. Abb. 15, ergab die Massenstromberechnung aus Full-Flow-Turbinen- und Dichtemessung eine überraschend gute Übereinstimmung zur Referenzmessung. Dieses Ergebnis läßt sich nur erklären, wenn bei diesen Versuchen die Strömungsgeschwindigkeit über dem Querschnitt relativ gleich verteilt war.

Insgesamt ist bei dem vorliegenden Material kein eindeutiger Zusammenhang zwischen einem der Versuchsparameter und den einzelnen Massenstromabweichungen zu erkennen. Eine weitere Verringerung der Fehlerbandbreiten durch Verbesserung der Berechnungsmodelle ist daher z.Zt. nicht möglich.

8. Schlußfolgerung

Obwohl die transiente Dampf-Wasser-Strömung im Versuchskreislauf nicht ganz den Verlauf einer allgemein zugrundegelegten Transiente eines LOCA erreichte, brachten die Versuche wichtige Erkenntnisse für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der untersuchten LOBI-Meßgeräte. Während einer Dauer von 30 s und mehr, lieferten die Versuche in der horizontalen Meßstrecke stark ausgeprägte inhomogene Zweiphasenströmungen. Derartige Strömungsformen gehören zu den ungünstigsten Bedingungen für die indirekte Massenstromermittlung und bieten deshalb eine ausgezeichnete Testmöglichkeit für die Geräte.

Bei der Interpretation der Ergebnisse wurden relative Fehlerbänder abgeleitet (Tabelle 3), die für die gesamte Versuchsserie die Streuung der Massenstromermittlungsfehler um einen Mittelwert beschreiben. Diese Streubreiten, die für jede Geräte-Kombination festgelegt wurden, stimmten recht gut mit den in Tabelle 6 angegebenen geschätzten Massenstromfehlern μ (einphasig) überein. Die durch die Streubereiche angegebene Meßunsicherheit bewegt sich je nach Geräte-Kombination und Meßbereich in den Grenzen von 10 bis 50 % des Meßwertes. Bei einem mittleren Meßbereich liegen sie jedoch im Allgemeinen bei 15 bis 30 %.

Aus den Mittelwerten der Fehlerstrebereiche konnte ein Korrekturfaktor für die verwendeten Berechnungsmodelle abgeleitet werden. Da dieser Korrekturfaktor von dem Spektrum möglicher Strömungsformen und auch vom Systemfehler der jeweiligen Gerätekombination abhängt, ist zur Zeit nicht anzugeben, mit welcher Toleranz er behaftet ist.

Außer dem Gamma-Densitometer und der Full-Flow Turbine von CENG hatten die Testgeräte eine relativ hohe Ausfallrate. Die Referenzgeräte hatten außer einem Thermoelement und einigen Drucktransmittern einwandfrei gearbeitet.

Die LOBI-Instrumentierung entspricht dem derzeitigen Stand der LOCE-Meßtechnik. Es ergibt sich jedoch neben der Verfeinerung der Berechnungsmodelle vor allem die Verbesserung der Einzelgerätemeßgenauigkeit und die Zuverlässigkeit der Geräte als Entwicklungsaufgabe für die Zukunft.

Literatur

- [1] John, H.; Reimann, J.; Alsmeyer, H. and Megerle, A.: "Seriellles 5-Strahl-Gamma-Densitometer zur Dichtemessung einer Zweiphasenströmung", KfK-2783 (Nov. 1979).
- [2] Class, G.; Wagner, K.; Reimann, J.: "Transient Two-Phase Mass Flow Rate Measurements with a True Mass Flow Meter"; Two-Phase Instrumentation Review Group Meeting, Troy, New York, March 13-14, 1978.
- [3] Wagner, K.; Reimann, J.; Class, G.; John, H.; Schloss, F.: "Transient and Steady-State Two-Phase Mass Flow Rate Measurements With a True Mass Flow Meter", ANS-Transaction-ENC 79 Vol. 31 (May 1979), pp. 431-433.
- [4] Hain, K.; Brüderle, F.; Butzer, W.; Schloss, F.; Vollmer, T.: "True Mass Flow Meter 50 - Ein direkt anzeigendes Massenstrom-Meßgerät hoher Genauigkeit für transiente Zweiphasenströmungen bis $\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$ ", KfK-3197 (Okt. 1981).
- [5] John, H.; Hain, K.; Brüderle, F.; Reimann, J.; Schloss, F.: "Test des Massenstrommeßgerätes TMFM-50 für Zweiphasenströmungen". KfK-3215, (Okt. 1981).
- [6] John, H.; Hain, K.; Brüderle, F.; Reimann, J.; Vollmer, T.: "Tests of an Advanced True Mass Flow Meter (TMFM) in Gas Liquid Flow". ASME-Paper 82-FE-23 (June 1982).
- [7] John, H.; Reimann, J.: "Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrommeßverfahren, Anlagenbeschreibung", KfK-2731 B, Febr. 1979.
- [8] John, H.; Müller, U.; Reimann, J.: "A Test Loop for Testing Measuring Methods for the Mass Flow Rate of Two-Phase Flows", 1976 Meeting of the European Two-Phase-Flow Group, Erlangen, May 30 - June 2, 1976.

- [9] Reimann, J.; John, H.; Demski, A.; Pawlak, L.; Seeger, W. and Weinbrecht R.: "Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrom-Meßverfahren", In: Projekt Nukleare Sicherheit, Jahresbericht 1980, KfK-2950 (Aug. 1981), s. 4100/75-4100/114.

- [10] John, H.; Reimann, J.; Müller, U.: "Test of Two-Phase Mass Flow Rate Instrumentation in Transient Steam Water Flow"; I.U.T.A.M. Symposium, Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase-Flows, Nancy, France, July 5-8, 1983.

- [11] Esparza, V.; Fortescue, T.: "LOBI-Instrumentation Uncertainty Analysis." Commission of the European Communities, J.R.C. Ispra T.N. 1.06.01.79.106, Dec. 79

- [12] Ohlmer, E.; Sanders, J.: "LOBI-Experimental Data Report Test Al-66". Commission of the European Communities, J.R.C. Ispra Comm. N. 3818, April 82

mittlere Teststreckenwerte						LOBI-Instrumente						Drosselblendendurchmesser
Blowdownnummer	Druck vor Blowdownbeginn /bar/	Druck kurz nach Blowdownbeginn /bar/	Temperatur vor Blowdownbeginn /°C/	Temperatur kurz nach Blowdownbeginn /°C/	maximaler Massenstrom	x hat funktioniert o gestörter Lauf						
						QD1	QD2	QT1	QT2	QF1	DD	
019	29	25	221	222	32.5	x	x	o	x	x	x	
023	30	25	200	220	44	x	o	x	x	x	x	Ø 35
024	42.5	33	218	236	43	x	o	x	o	x	x	Ø 35
025	53.5	42	227	250	31.5	x	o	x	x	x	x	Ø 27
026	30.8	29	222	232	19.5	x	o	x	o	x	x	Ø 22
027	22.5	21	192	214	19.5	x	o	x	o	x	x	Ø 22
029	43.2	38.4	211	250	26.5	x	x	o	o	x	x	Ø 22
030	61	55	249	272	29.5	x	x	o	o	x	x	Ø 22
031	80	72.5	280	290	31	x	x	o	x	x	x	Ø 22
033	39.8	32	230	238	41	x	o	x	o	x	x	Ø 32

Tabelle 1

Blowdown Nr.	QD1,DD			QD2,DD			QT1,DD		QT2,DD		QF1,DD		QD1,QF1	QD2,QF1	QD1,QT1	QD2,QT2
	Typ	$A_{DB} \sqrt{\frac{m^2}{s}}$	f_{bDB}	Typ	$A_{DB} \sqrt{\frac{m^2}{s}}$	f_{bDB}	Typ	f_{bT}	Typ	f_{bT}	Typ	f_{bF}				
	K			K			K		K		K		K	K	K	K
019	IS-10	96	0,8556	IS-11	96	0,8556	TISP-1	0,7602	TISP-1	0,7602		0,8136	26,073	26,073	27,905	27,905
	19,205			19,205			$1,26885 \cdot 10^{-3}$		$1,26885 \cdot 10^{-3}$		$1,35798 \cdot 10^{-3}$					
023	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	"			"			"		"		"					
024	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	"			"			"		"		"					
025	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	"			"			"		"		"					
026	"	"	"	"	"	"	TISP-6	"	TISP-7	"	"	"	"	"	"	"
	"			"			"		"		"					
027	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	"			"			"		"		"					
029	"		0,878	IS-18	57,2	0,878	TISP-1	"	TISP-2	"	"	"	27,458	46,084	29,385	49,318
	19,707			33,075			"		"		"					
030	"	"	"	"	"	"	TISP-10	"	TISP-C	"	"	"	"	"	"	"
	"			"			"		"		"					
031	"	"	"	"	"	"	TISP-1	"	TISP-2	"	"	"	"	"	"	"
	"			"			"		"		"					
033	"	"	"	"	"	"	TISP-10	"	"	"	"	"	"	"	"	"
	"			"			"		"		"					

Tabelle 2

Kombination für Massenstromberechnung	Verfügbarkeit [%]	Streubereich (Einhüllende) [%]	Mittelwert des Streubereiches (Korrekturwert)	relatives Fehlerband [%]
QD1/DD	100	1,3 - 1,65	1,475	± 17,5
QD2/DD	40	1,1 - 1,6	1,35	± 25
QT1/DD	60	0,65 - 1,2	0,925	± 27,5
QT2/DD	40	0,6 - 0,9	0,75	± 15
QF1/DD	100	1,0 - 1,45	1,225	± 22,5
QD1/QF1	100	1,5 - 2,25	1,875	± 37,5
QD2/QF1	40	0,75 - 1,4	1,075	± 32,5
QD1/QT1	40	(1,7 - 2,6)	(2,15)	(± 45)
QD2/QT2	20	unsicher	—	—

Tabelle 3: Massenstromverhältnisse $\dot{m}_{\text{LOBI}}/\dot{m}_{\text{Ref.}}$ ($\dot{m}_{\text{Ref.}} \geq 5 \text{ kg/s}$)

Kombination für Massenstromberechnung	Verfügbarkeit [%]	Streubereich (Einhüllende) [%]	Mittelwert des Streubereiches [%]	absolutes Fehlerband [%]
QD1/DD	100	5 ÷ 20	12,5	± 7,5
QD2/DD	40	-3 ÷ 8	2,5	± 5,5
QT1/DD	60	-10 ÷ 6	-2	± 8
QT2/DD	40	-12 ÷ -3	-7,5	± 4,5
QF1/DD	100	0 ÷ 18	9	± 9
QD1/QF1	100	9 ÷ 32	20,5	± 11,5
QD2/QF1	40	-6 ÷ 12	3	± 9
QD1/QT1	40	(10 ÷ 35)	(22,5)	(± 12,5)
QD2/QT2	20	unsicher	—	—

Tabelle 4: Absoluter Massenstromfehler $(\dot{m}_{LOBI} - \dot{m}_{Ref.}) / \dot{m}_{Ref.max} \cdot 100$ [%]
 $(\dot{m}_{Refer\ max} = 50\ kg/s)$

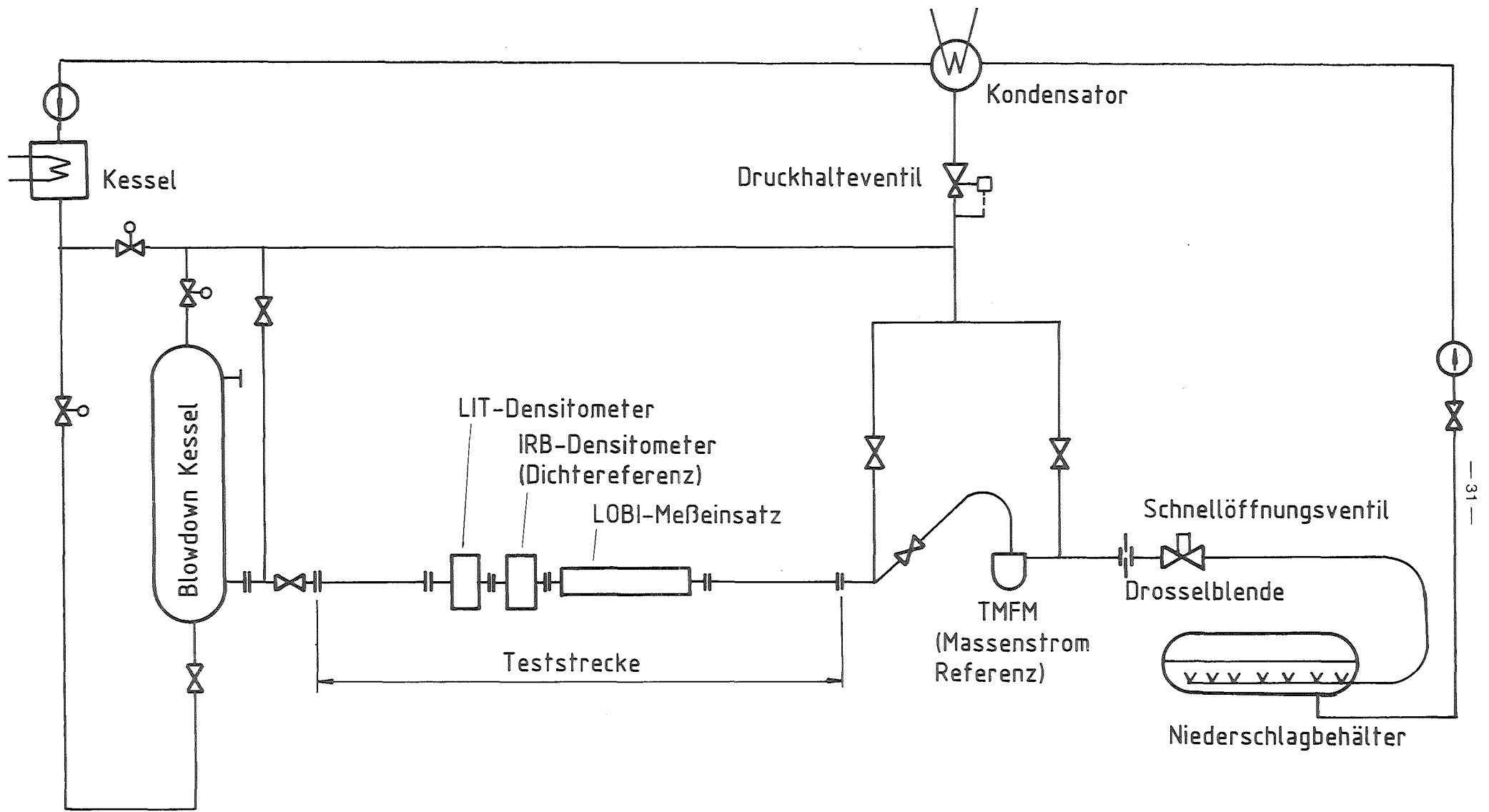
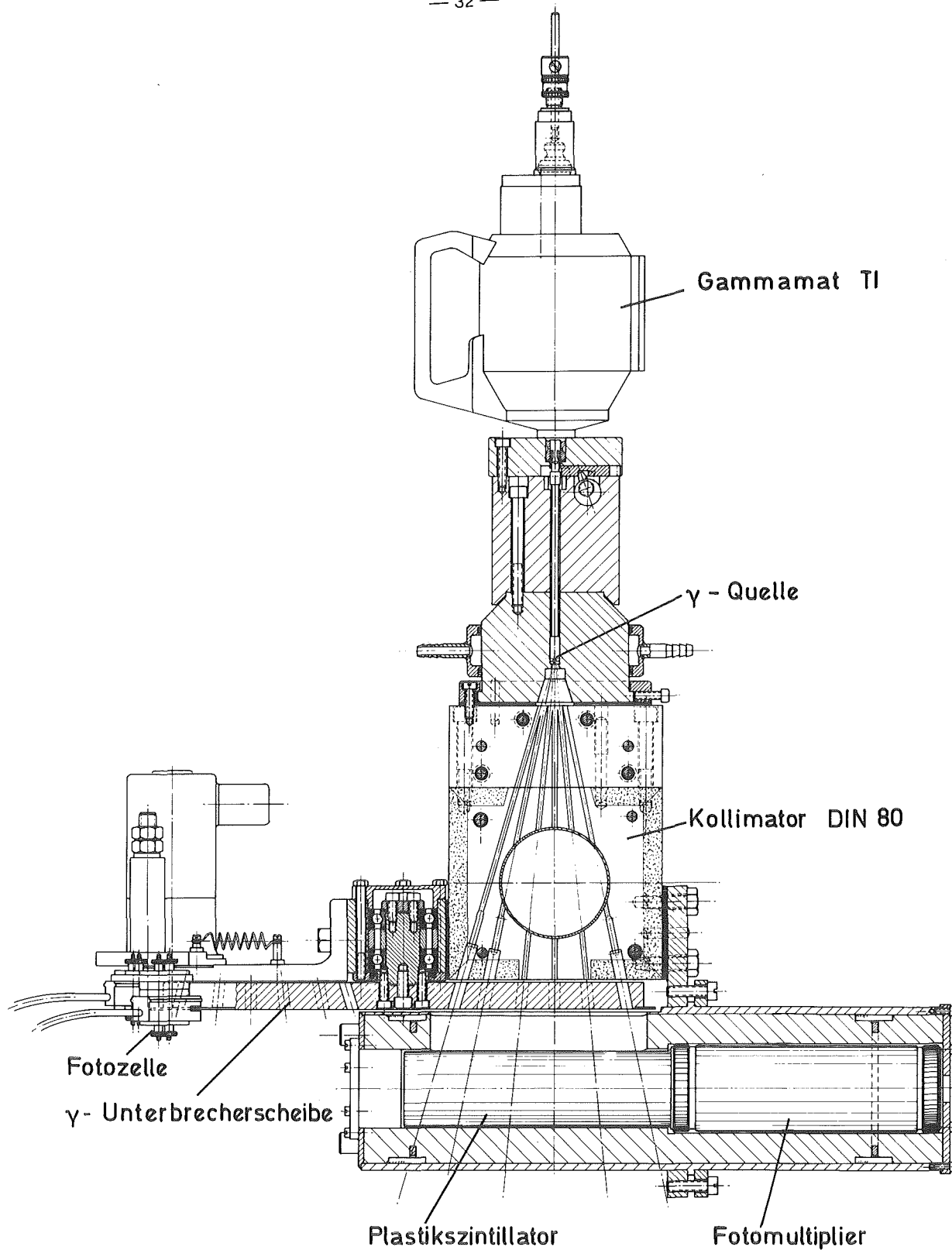


Abb. 1 Kreislau für instationäre Zweiphasenströmung



Gamma - Densitometer 50/80 mit Kollimator NW 80

Abb. 2

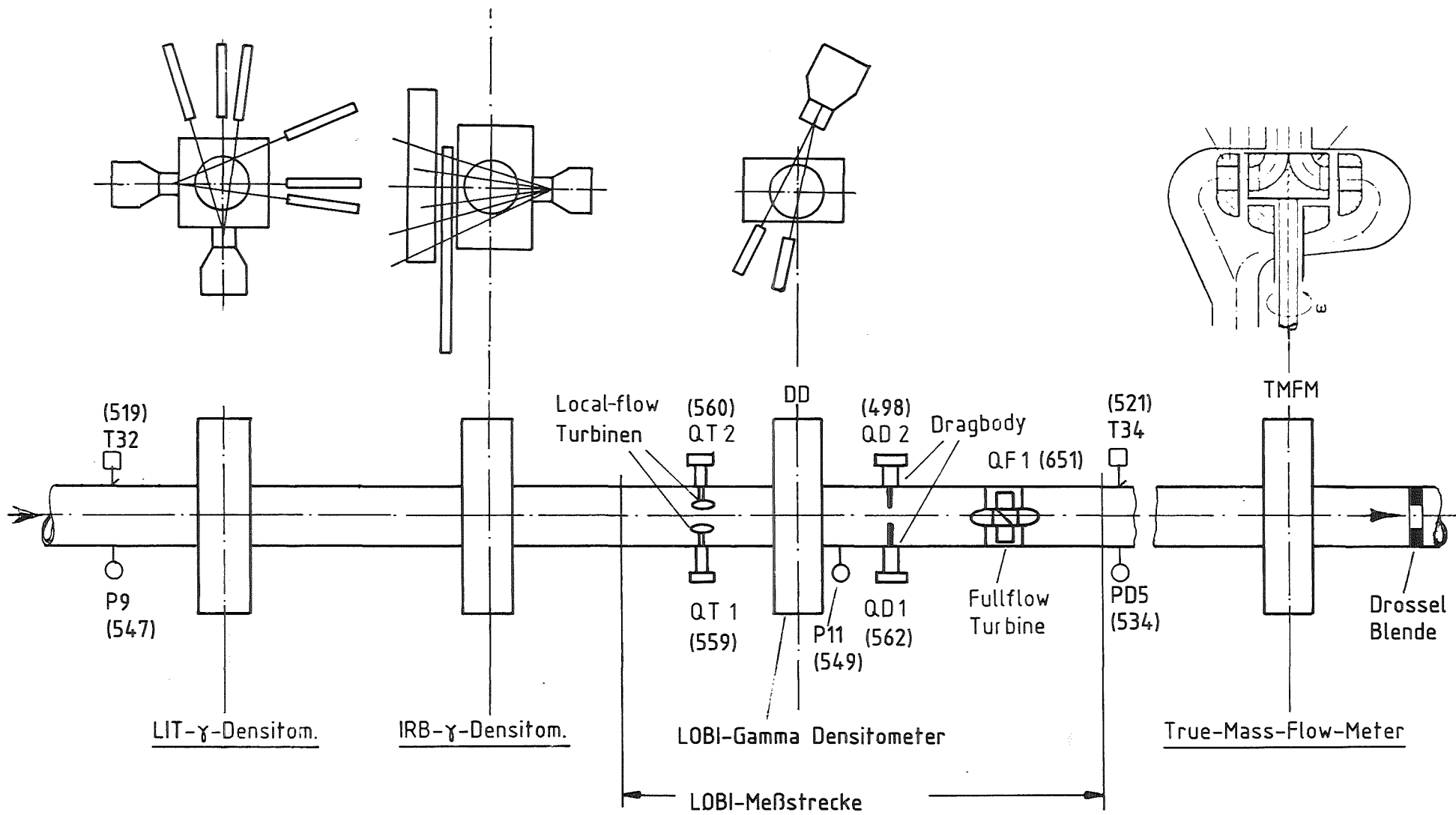
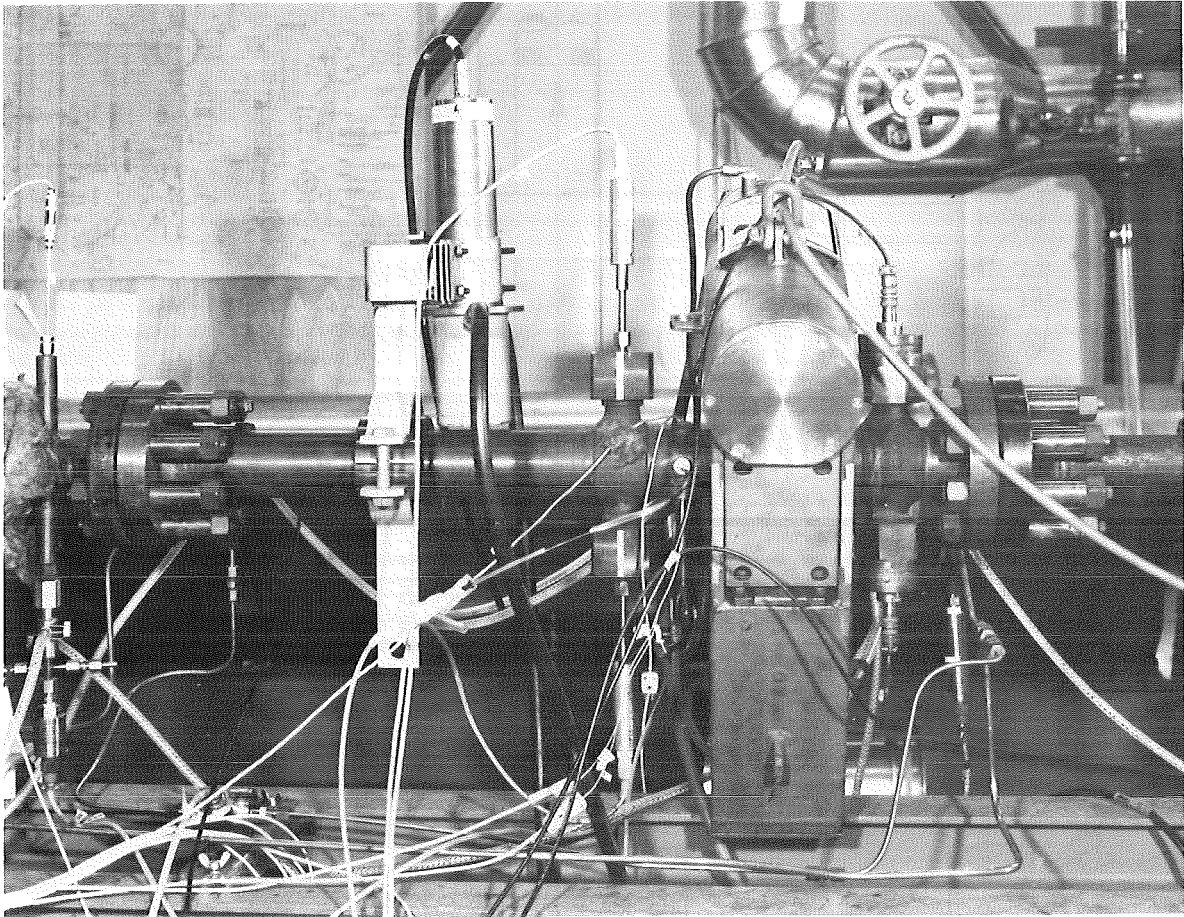


Abb. 4 Instrumentierte Teststrecke



LOBI - Meßeinsatz

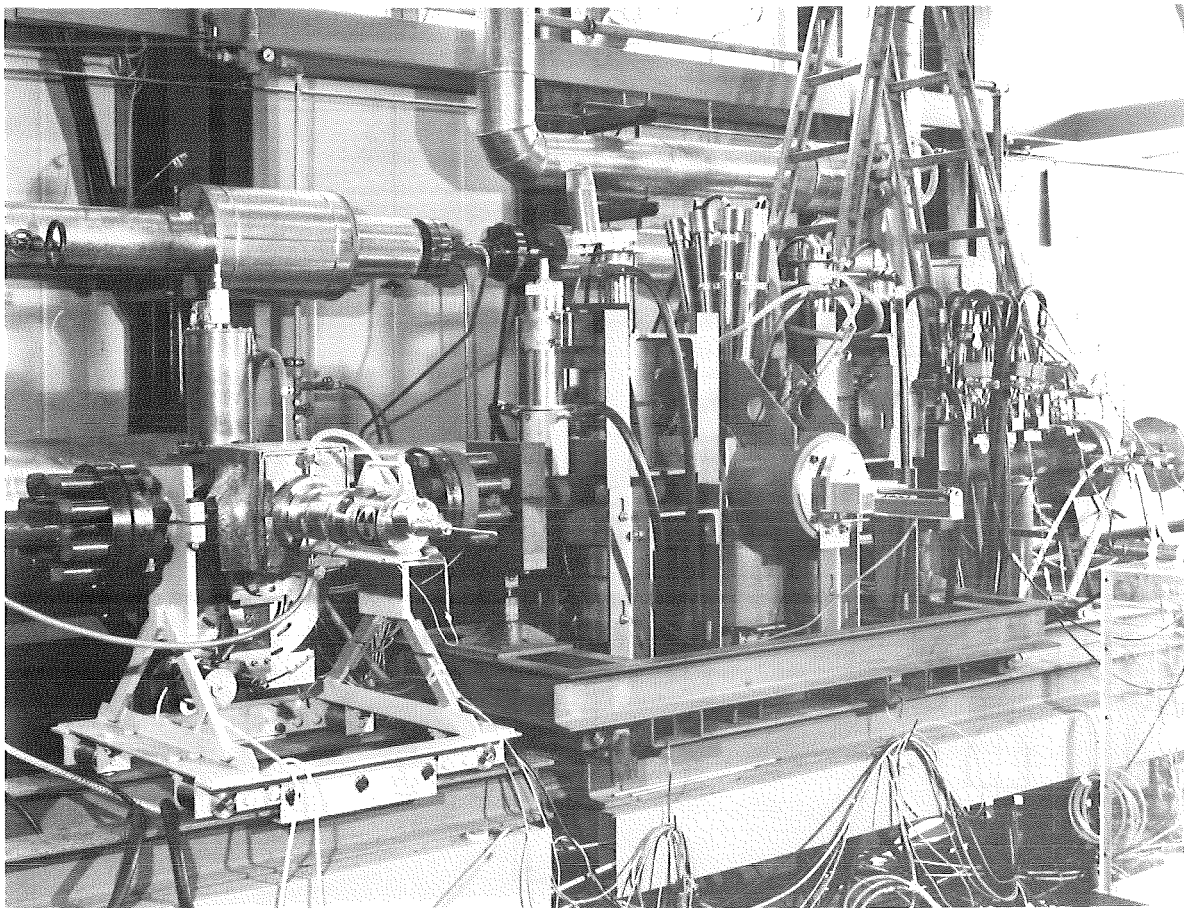


Abb.5: 5-Strahl- (links) und 6-Strahl-Densitometer (rechts)

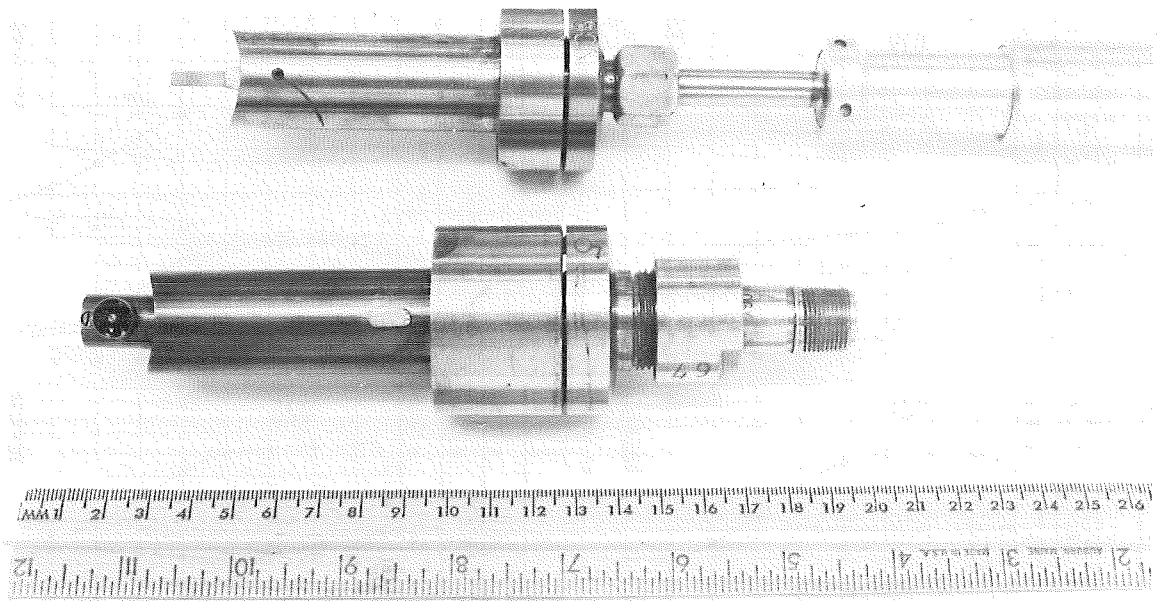


Abb.6: Einsätze mit Dragbody (oben) und Local-flow Turbine (unten)

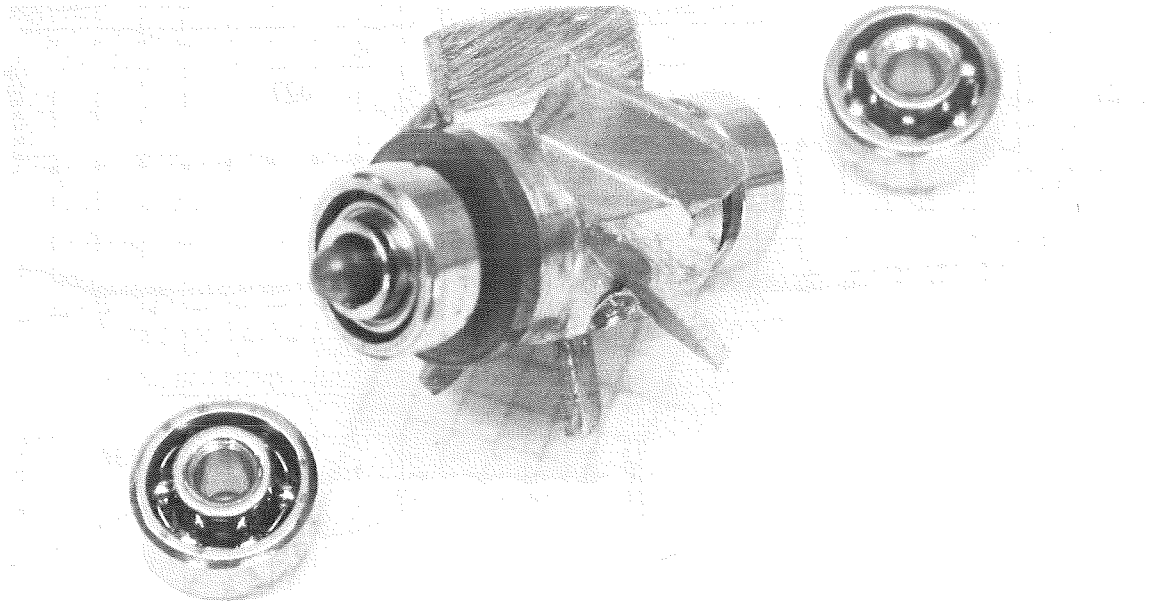


Abb.7: Local-flow Turbine

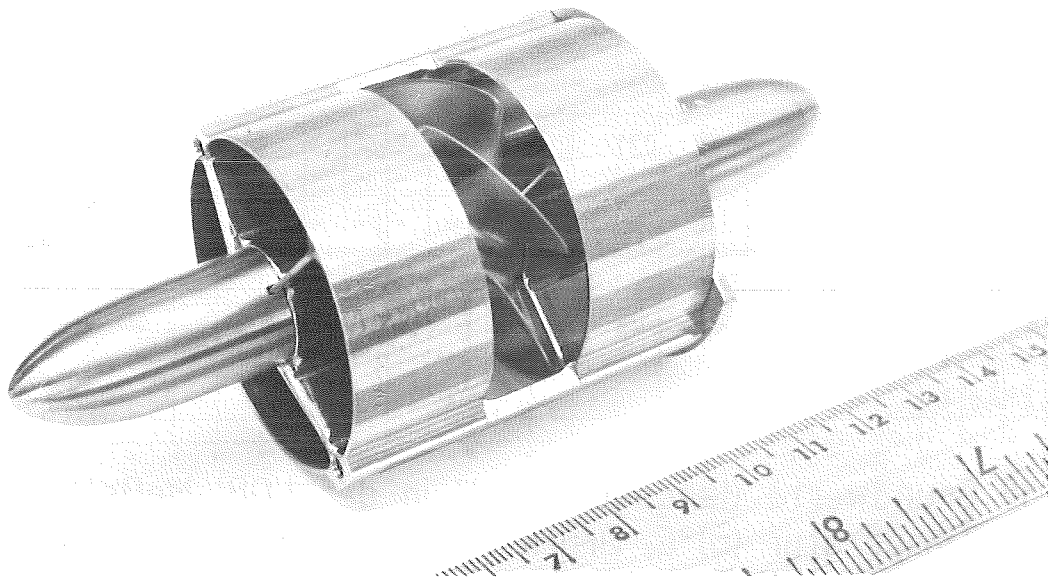


Abb.8: Full-Flow Turbine

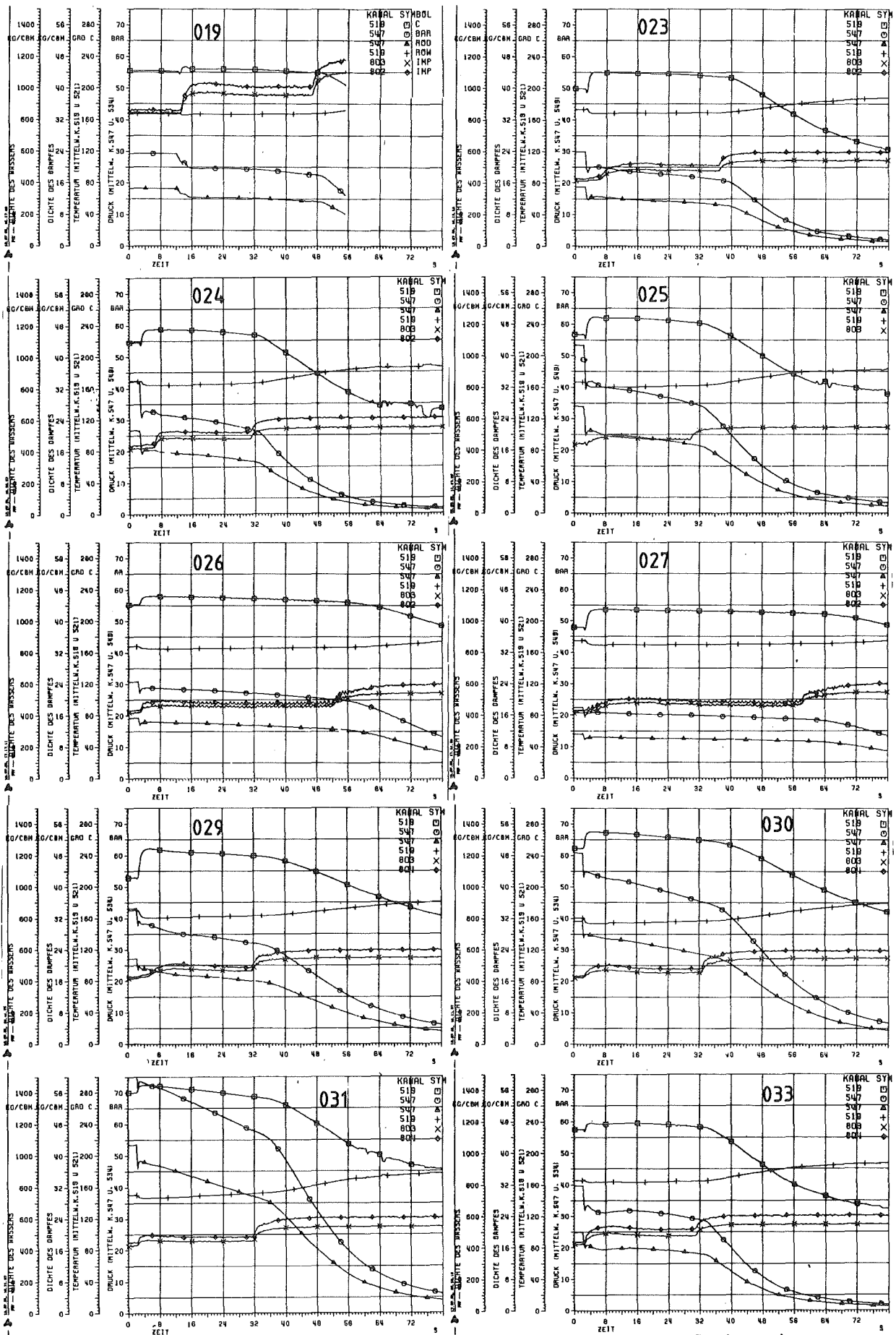


Abb. 10 Grundwerte (längsgemittelt) in der LOBI-Meßstrecke:
 Temperatur (□)°C, Druck (○)bar, Dampfdichte (△)kg/m³
 Wasserdichte (+)kg/m³ u. Zählraten des Densitometers (×)

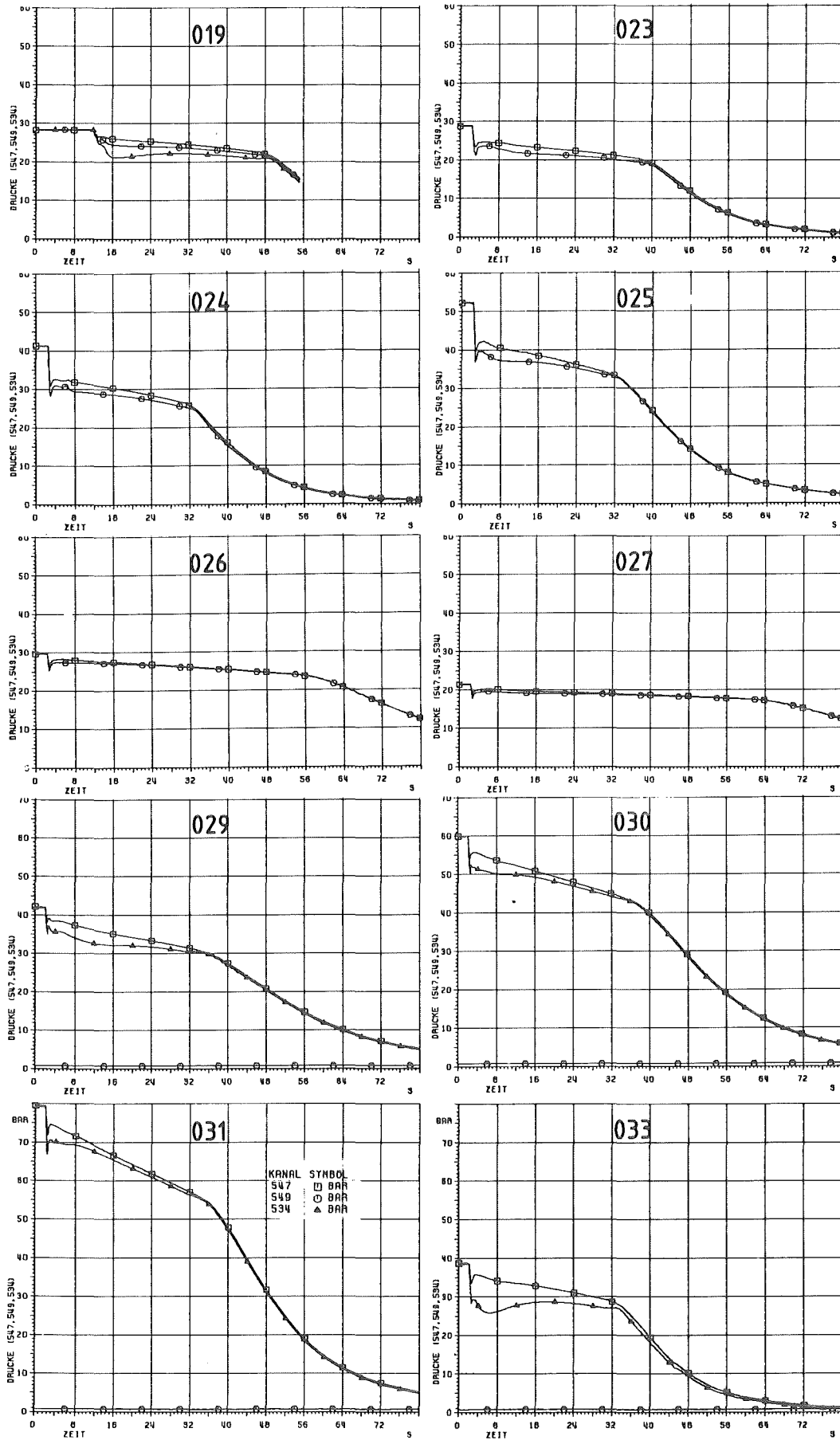


Abb.11 Meßstreckendrucke P9 (□), P11 (○) u. PD5 (△) in bar

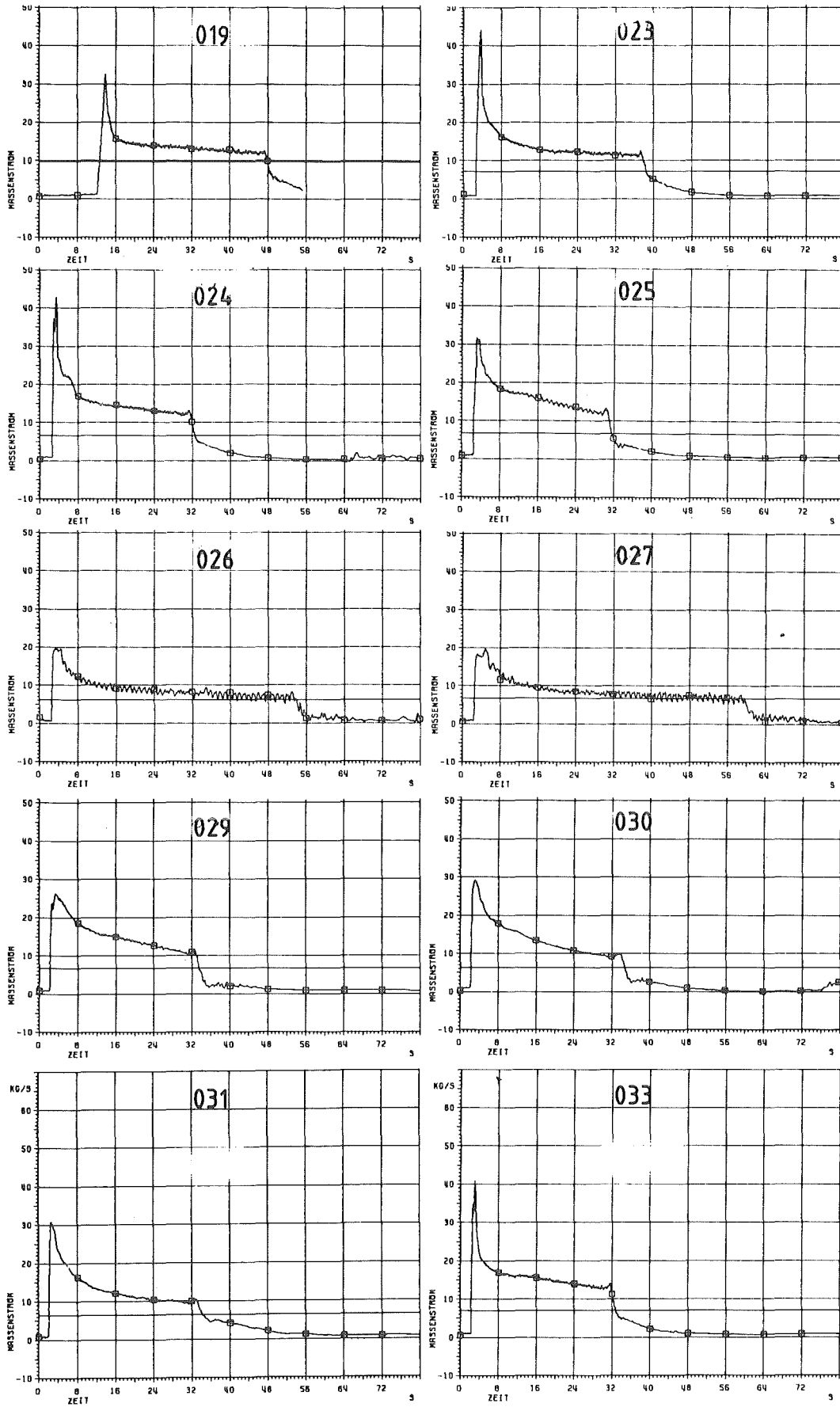


Abb. 12 Referenzmassenstrom (korrigiert) vom True Mass Flow Meter in kg/s

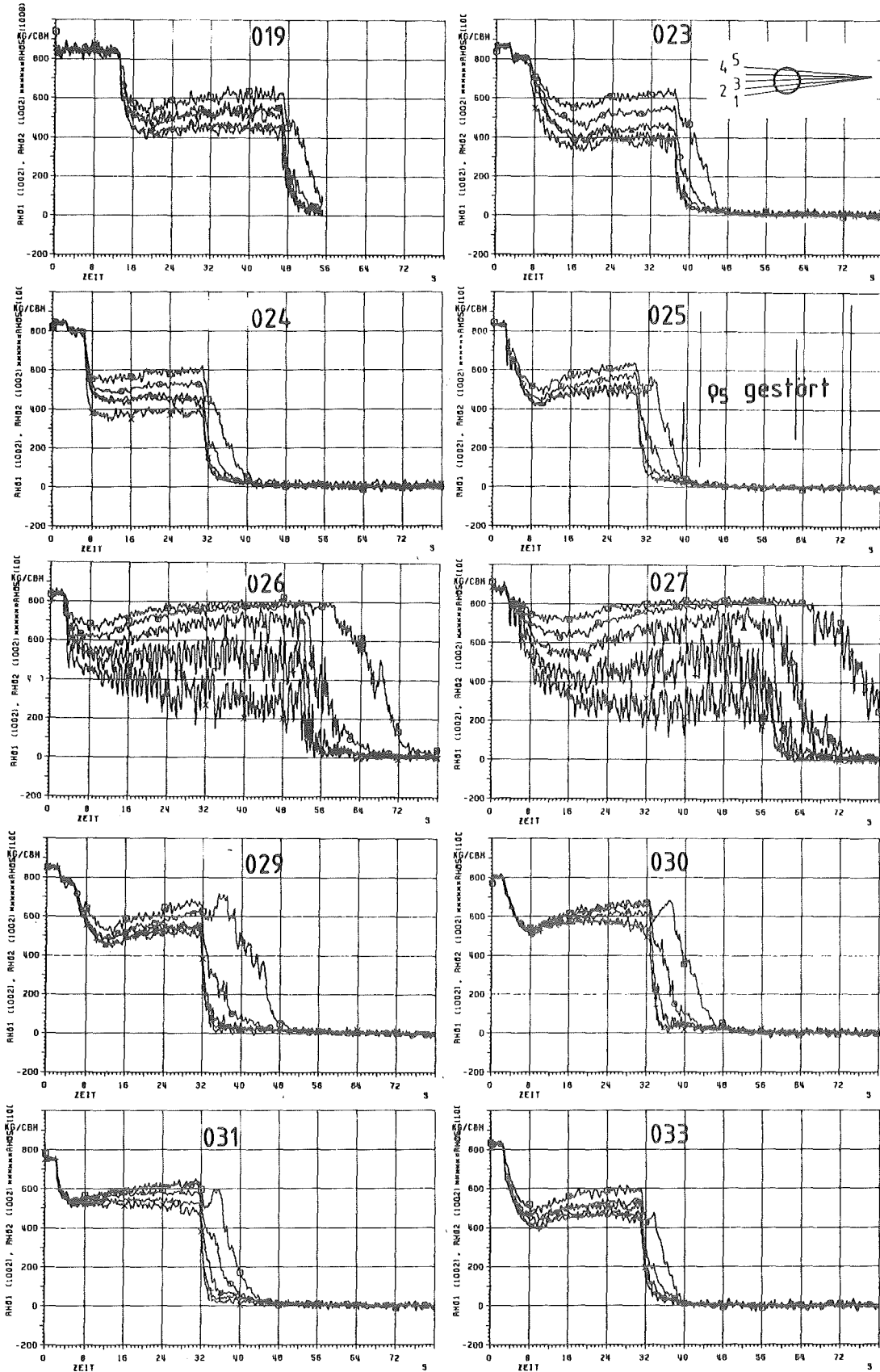


Abb. 13 Liniendichten des 5 Strahl-IRB-Densitometers $\rho_1(\square)$, $\rho_2(\circ)$, $\rho_3(\triangle)$, $\rho_4(+)$, $\rho_5(\times)$ in kg/m^3

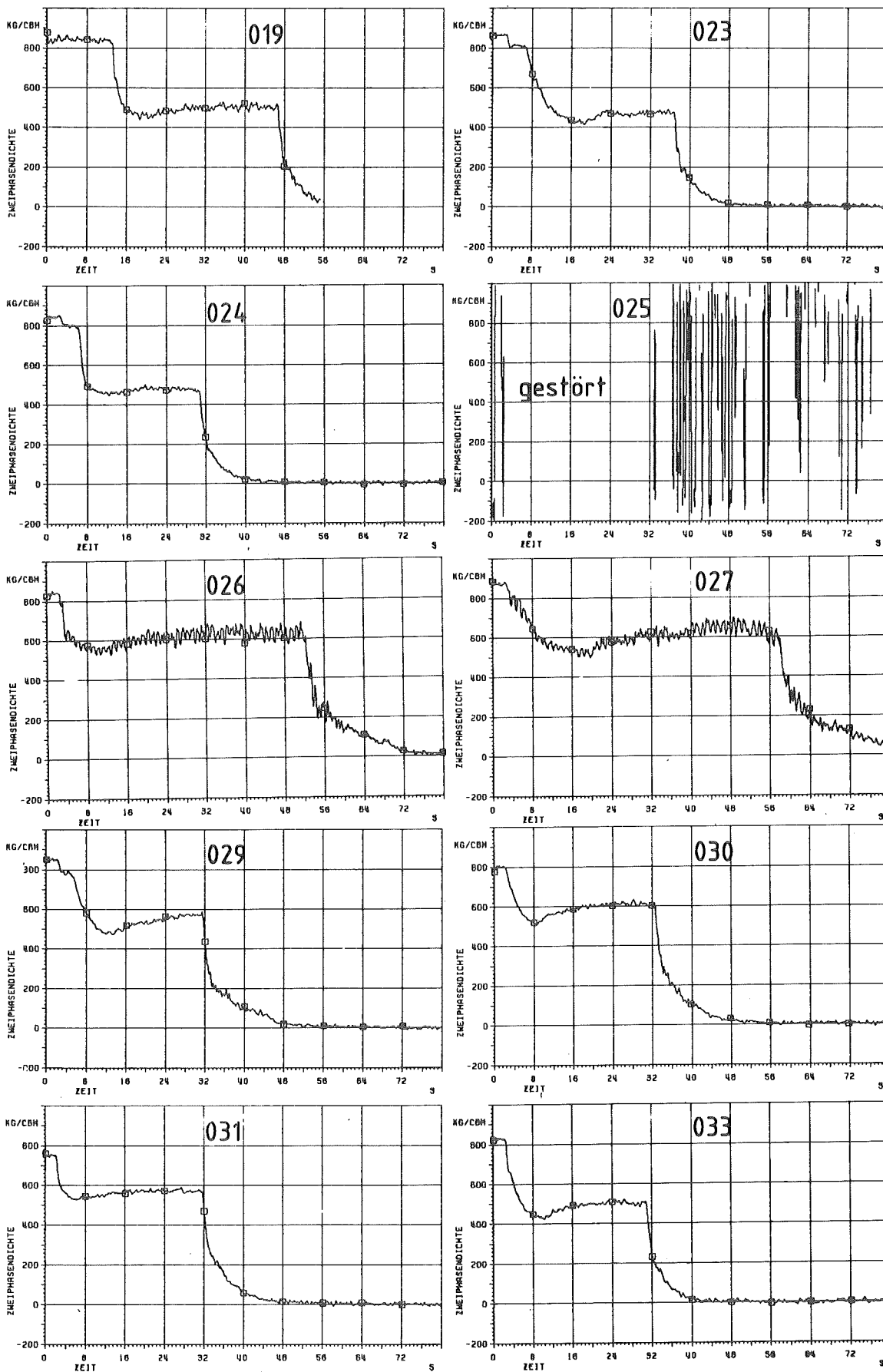


Abb.14 Querschnittsgemittelte Dichte des IRB-Densitometers in kg/m^3

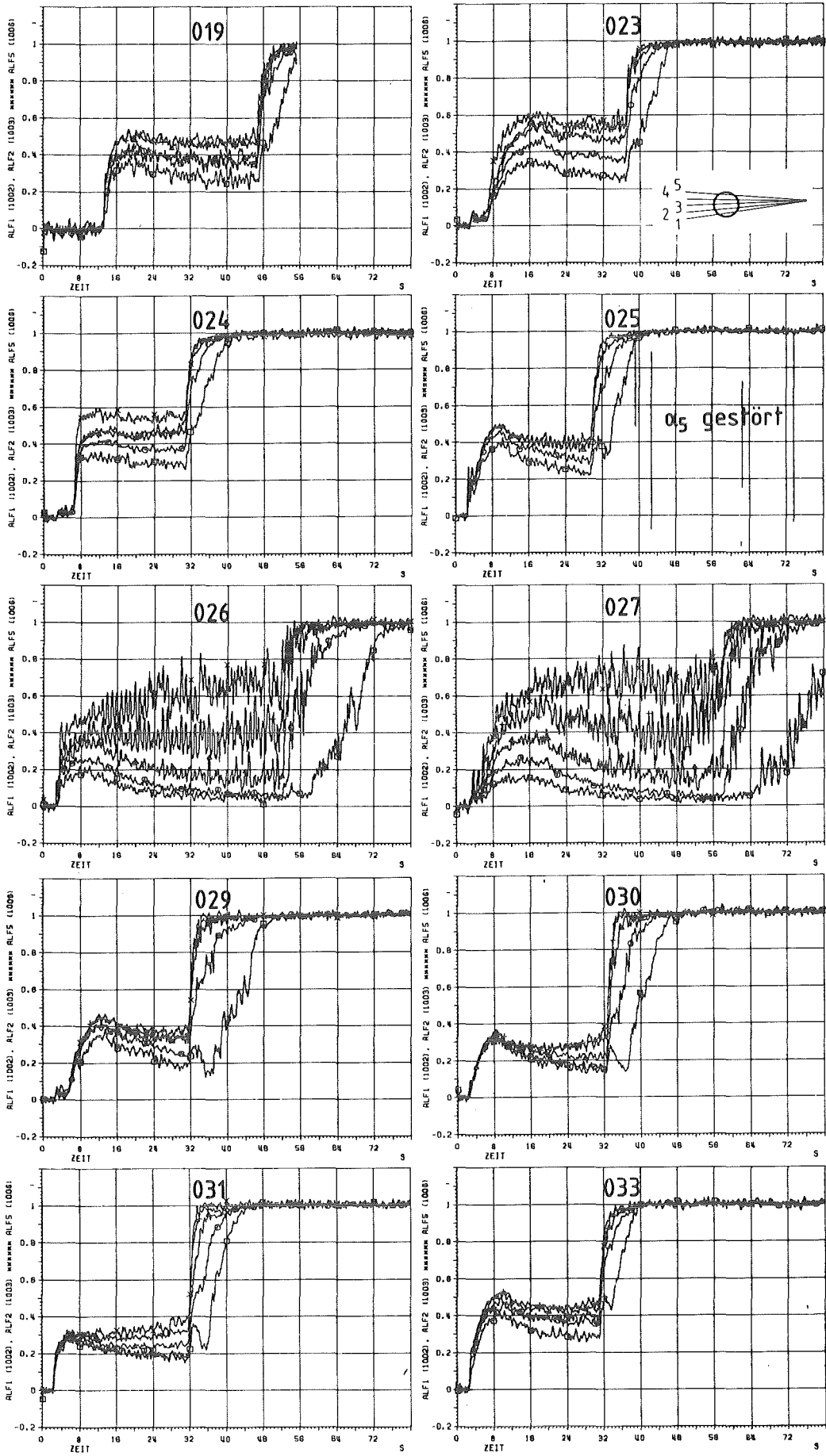


Abb. 15 Liniendampfvolumenanteile des IRB-Densitometers $\alpha_1(\square)$, $\alpha_2(\circ)$, $\alpha_3(\Delta)$, $\alpha_4(+)$, $\alpha_5(\times)$

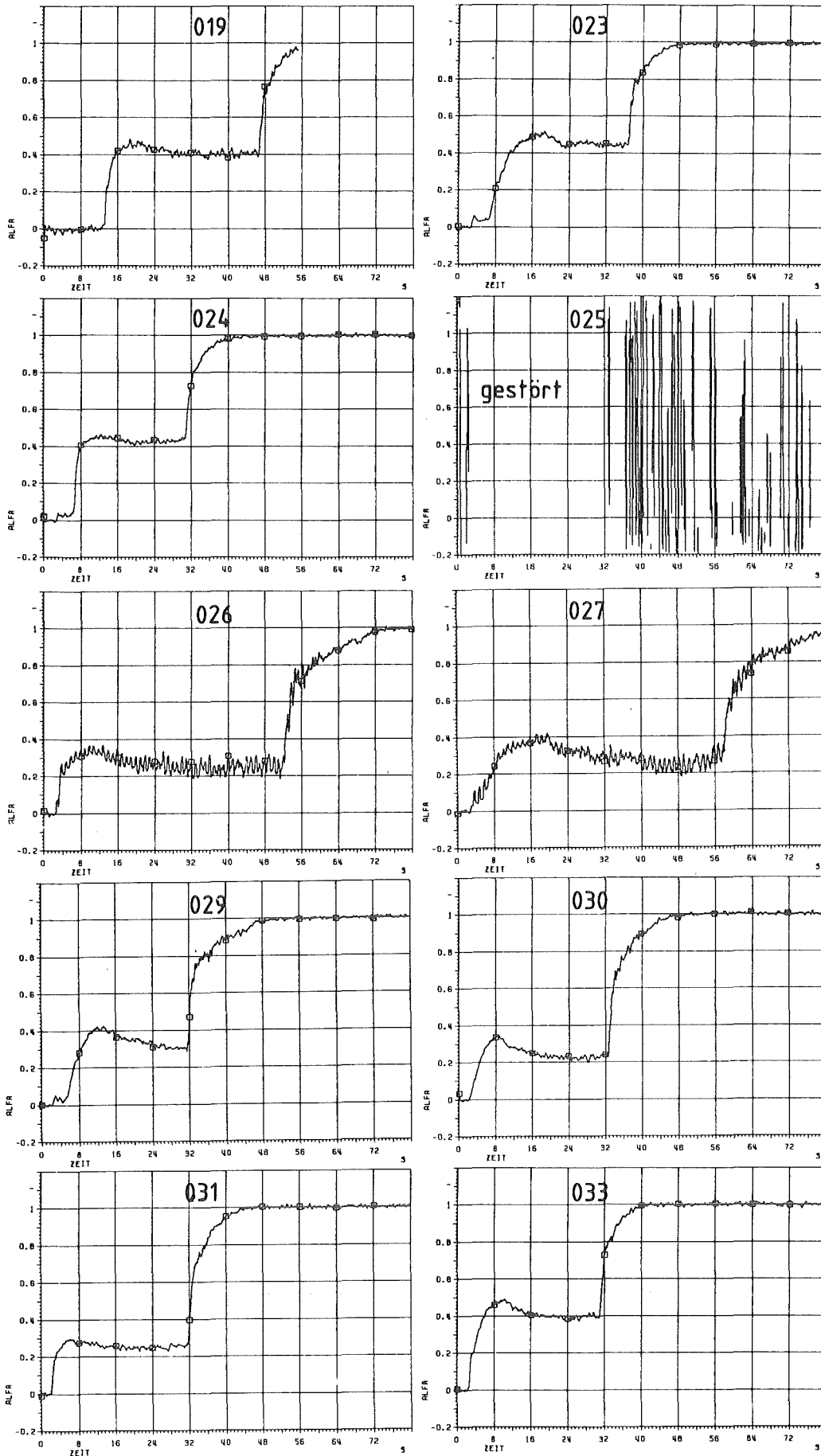


Abb. 16 Querschnittsgemittelter Dampfvolumenteil des IRB-Densitometers

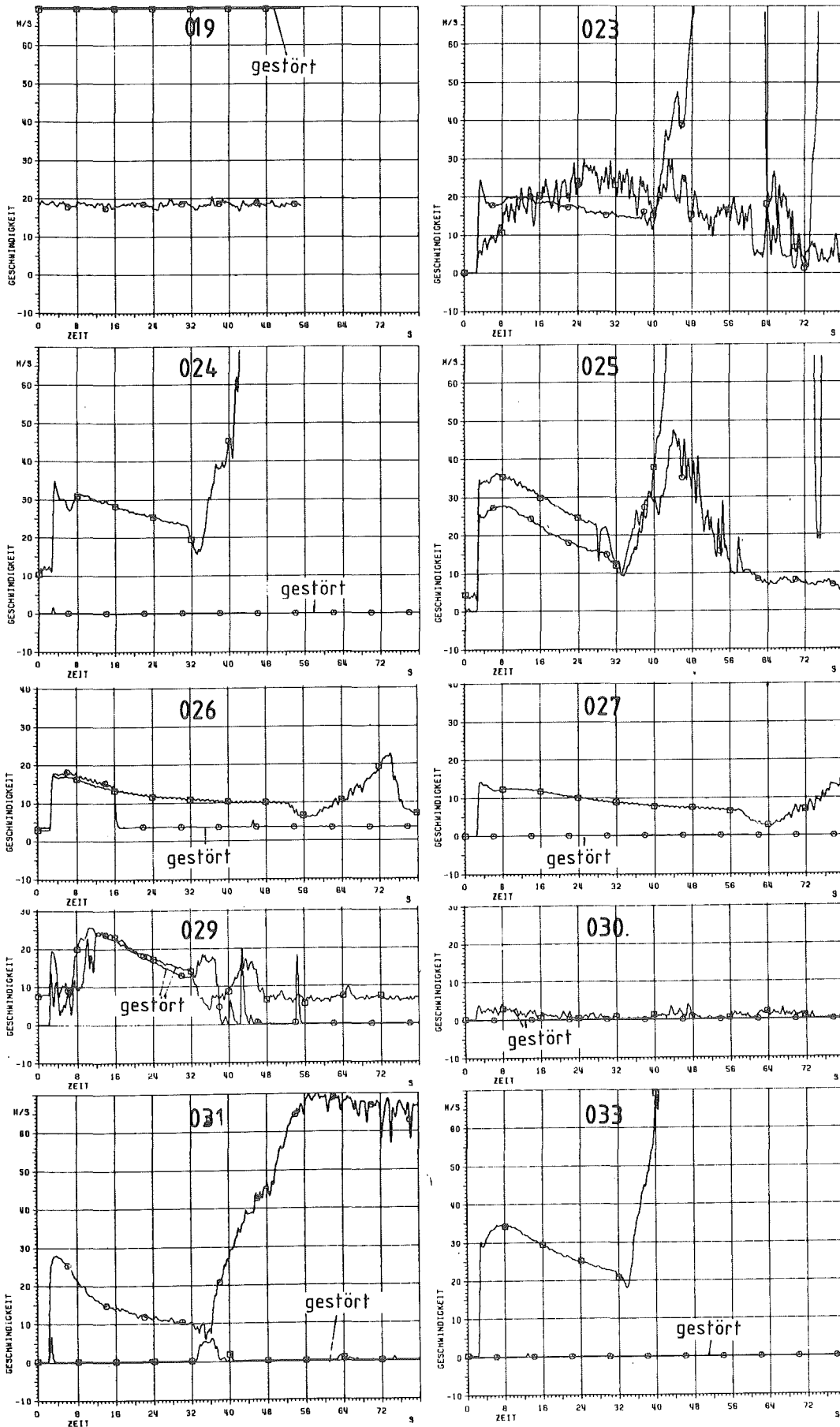


Abb. 17 Geschwindigkeit gemessen mit Local-flow Turbinen QT1 (□) und QT2 (○) in m/s

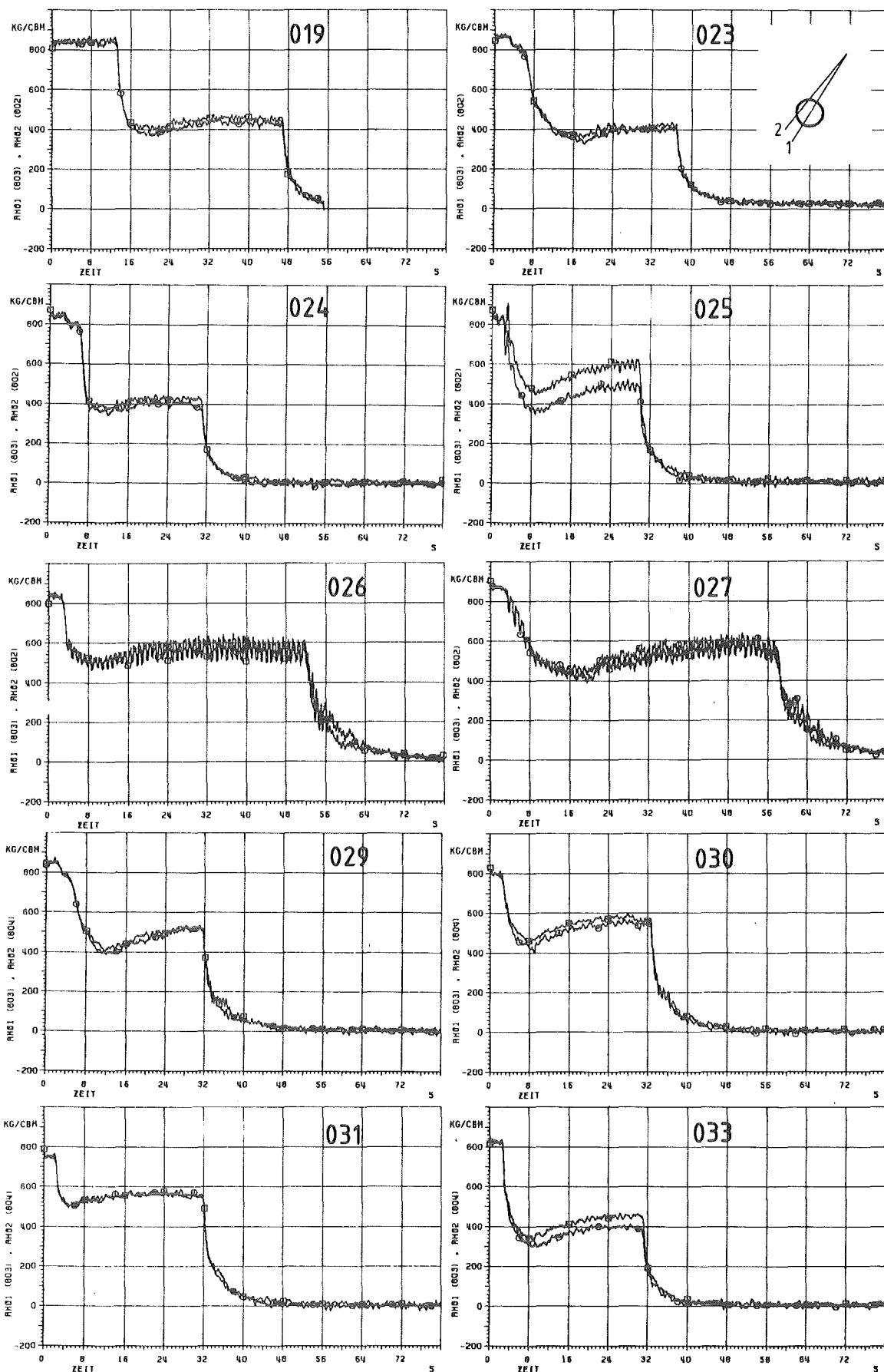


Abb. 18 Liniendichte des LOBI-Densitometers DD
 ρ_1 (\square), ρ_2 (\circ) in kg/m^3

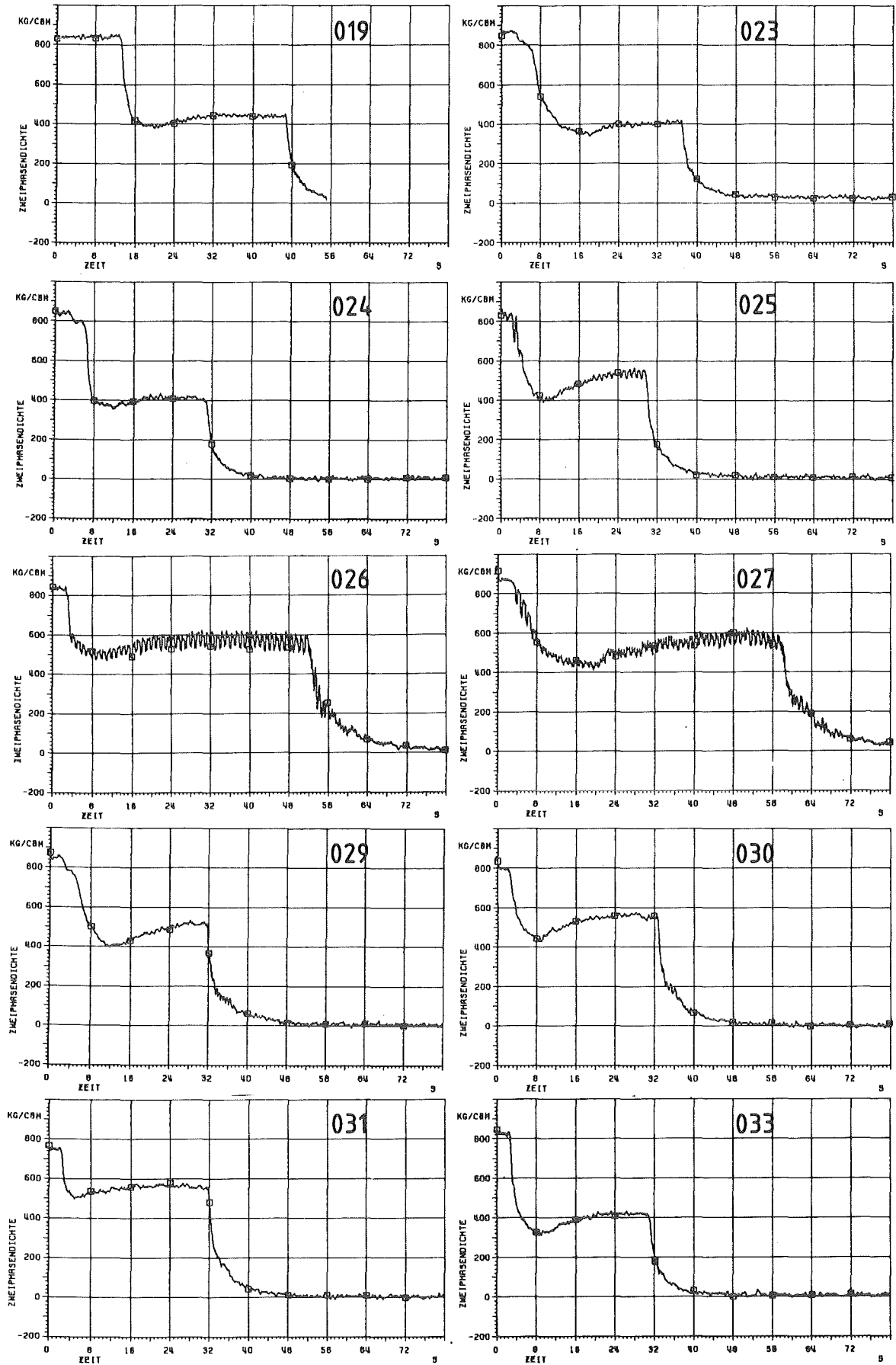


Abb. 19 Querschnittsgemittelte Dichte des LOBI-Densitometers DD in kg/m^3

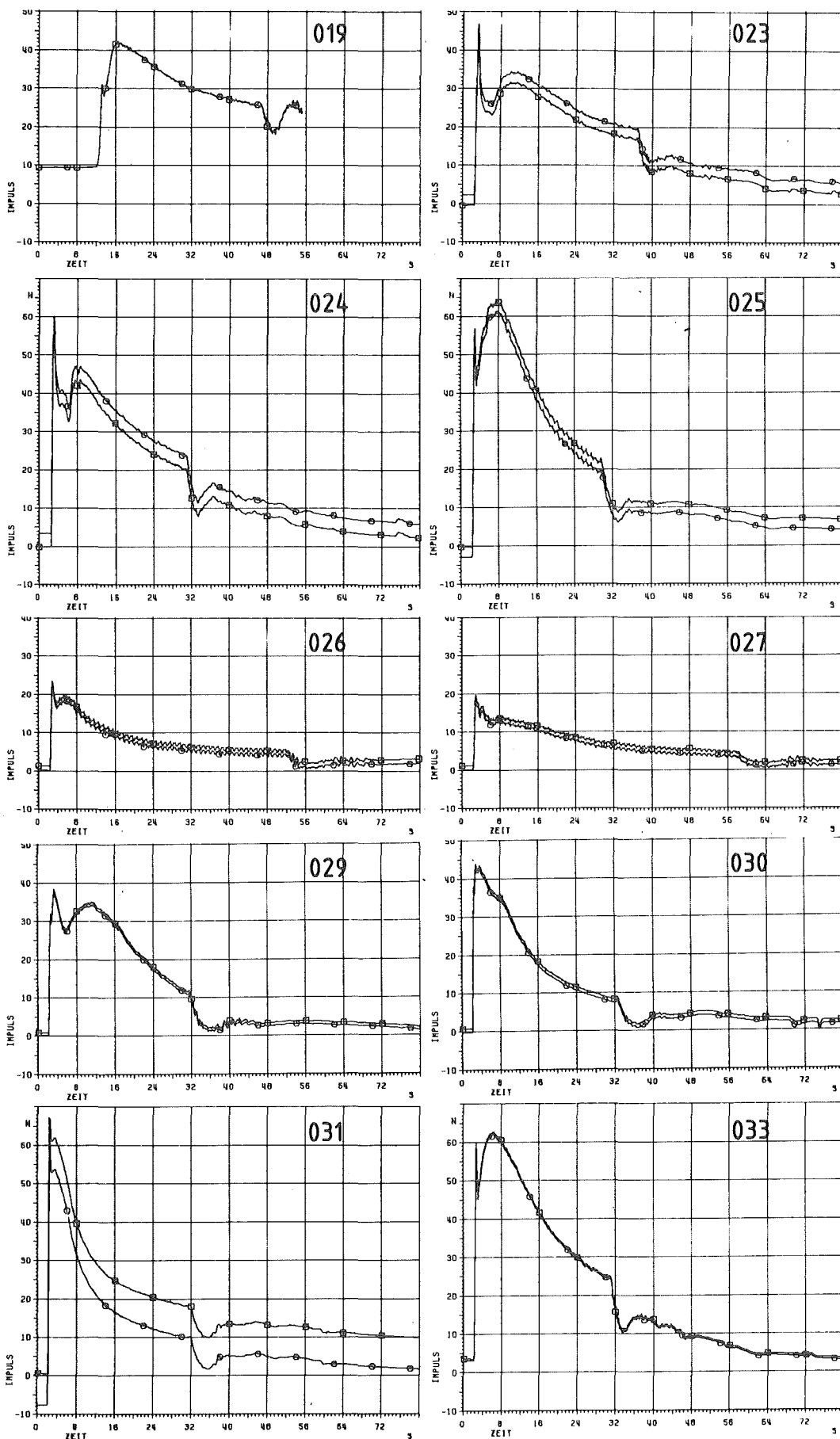


Abb.20 Impulsfluß des Drag Body QD1 mit (○) und ohne (□) korrektur in N

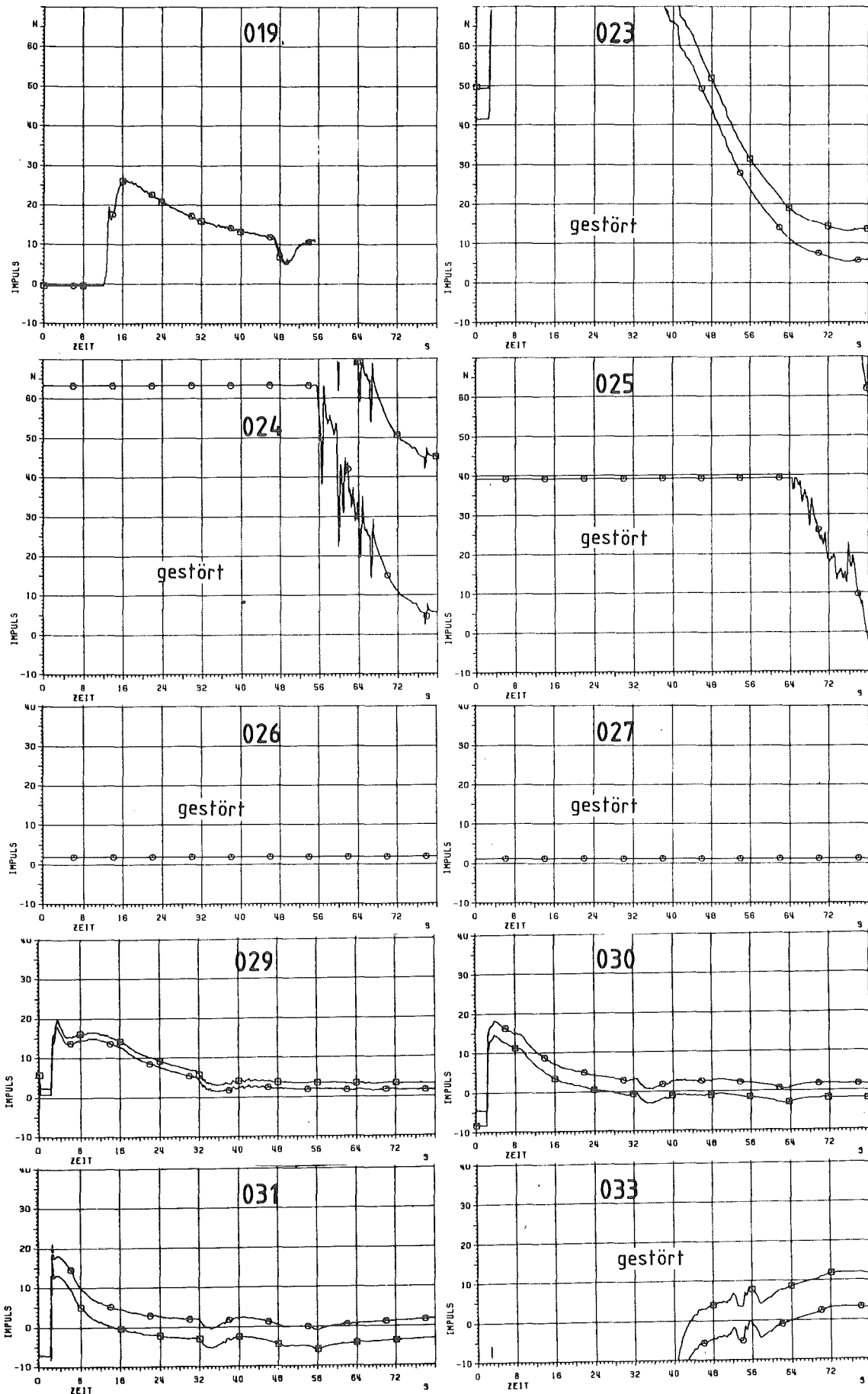


Abb. 21 Impulsfluß des Drag Body QD2 mit (○) und ohne (□) korrektur in N

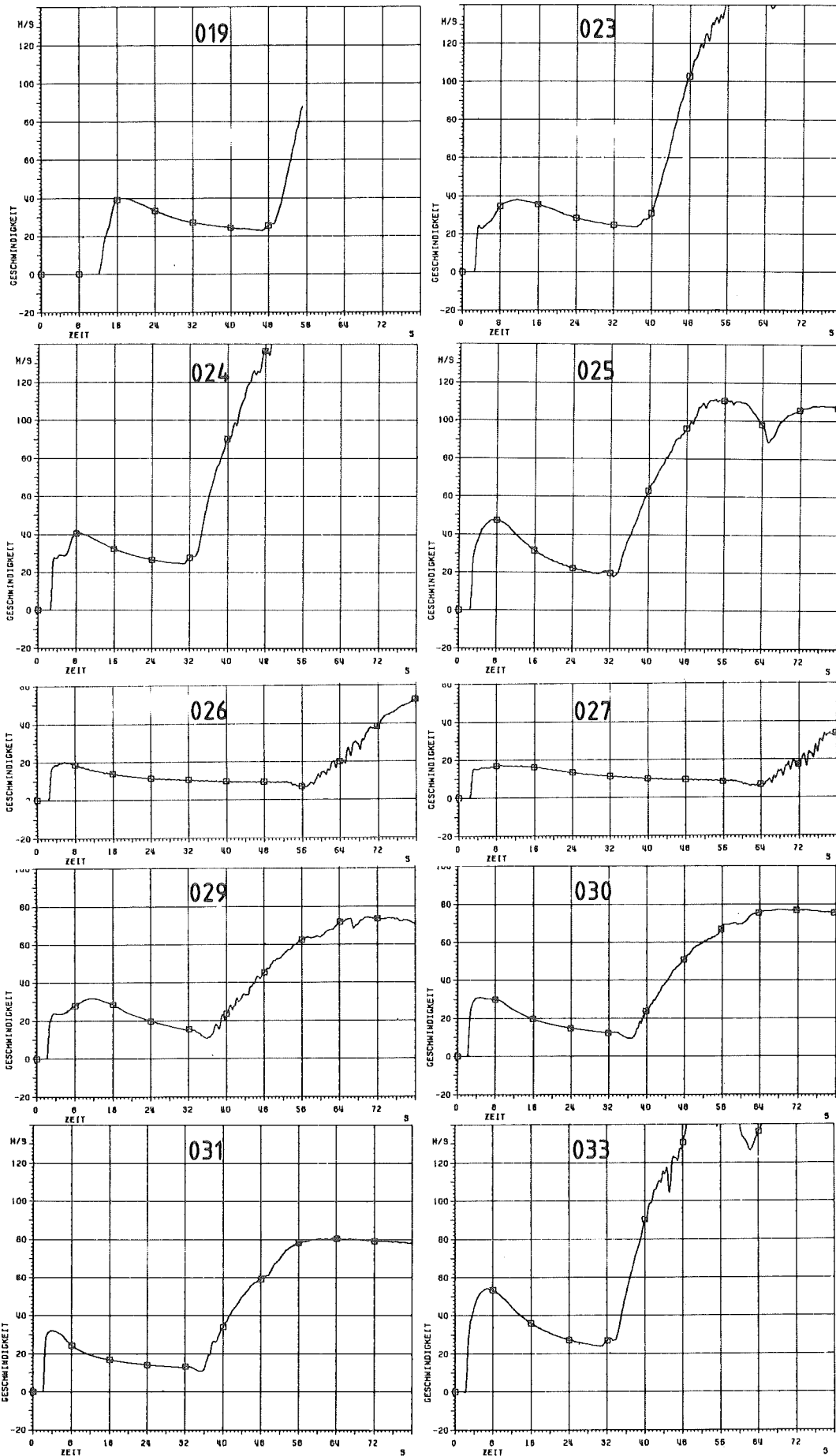


Abb. 22 Geschwindigkeit gemessen mit der Full-flow Turbine QF 1 in m/s

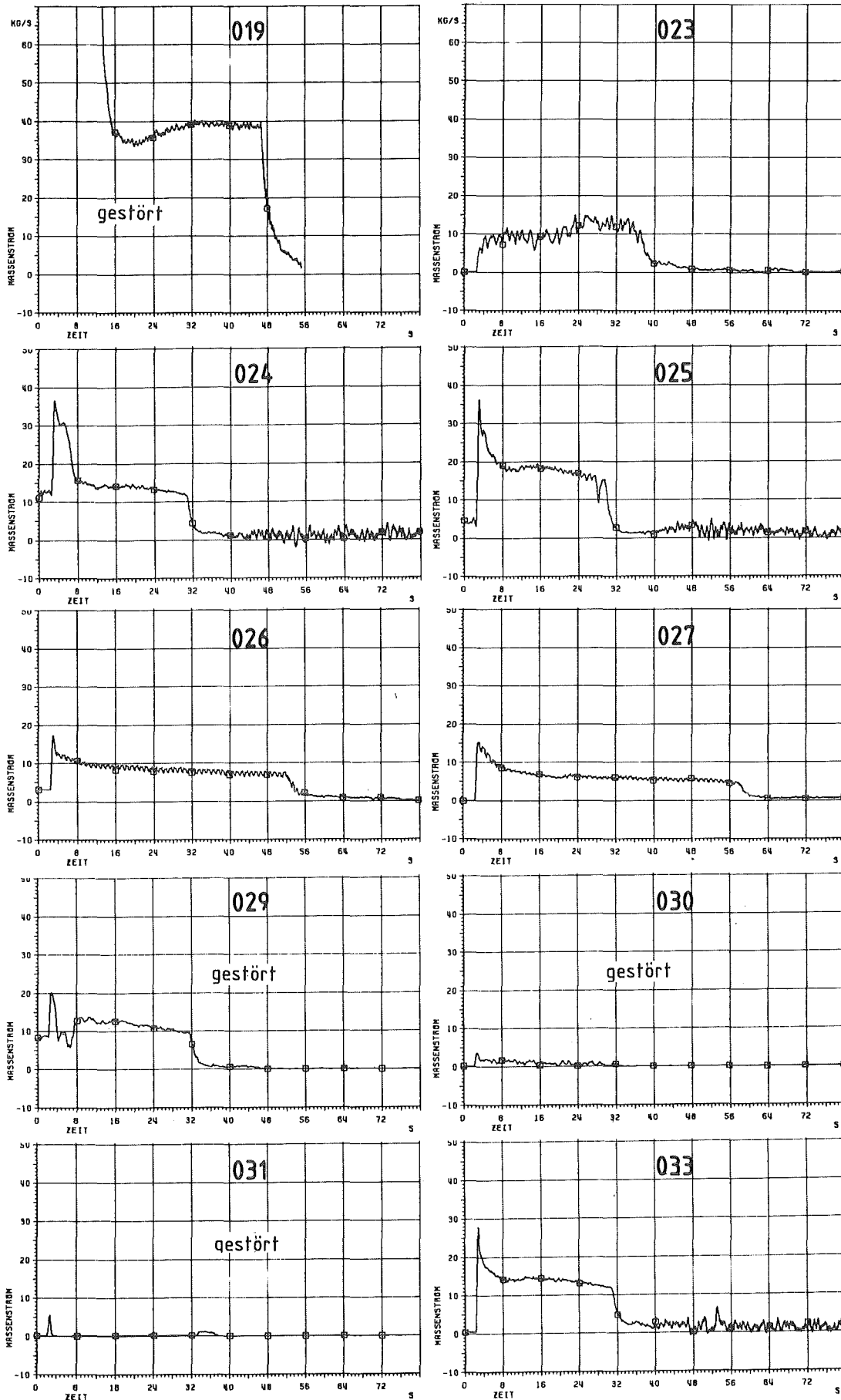


Abb. 23 Massenstrom aus QT1 und Densitometer DD in kg/s

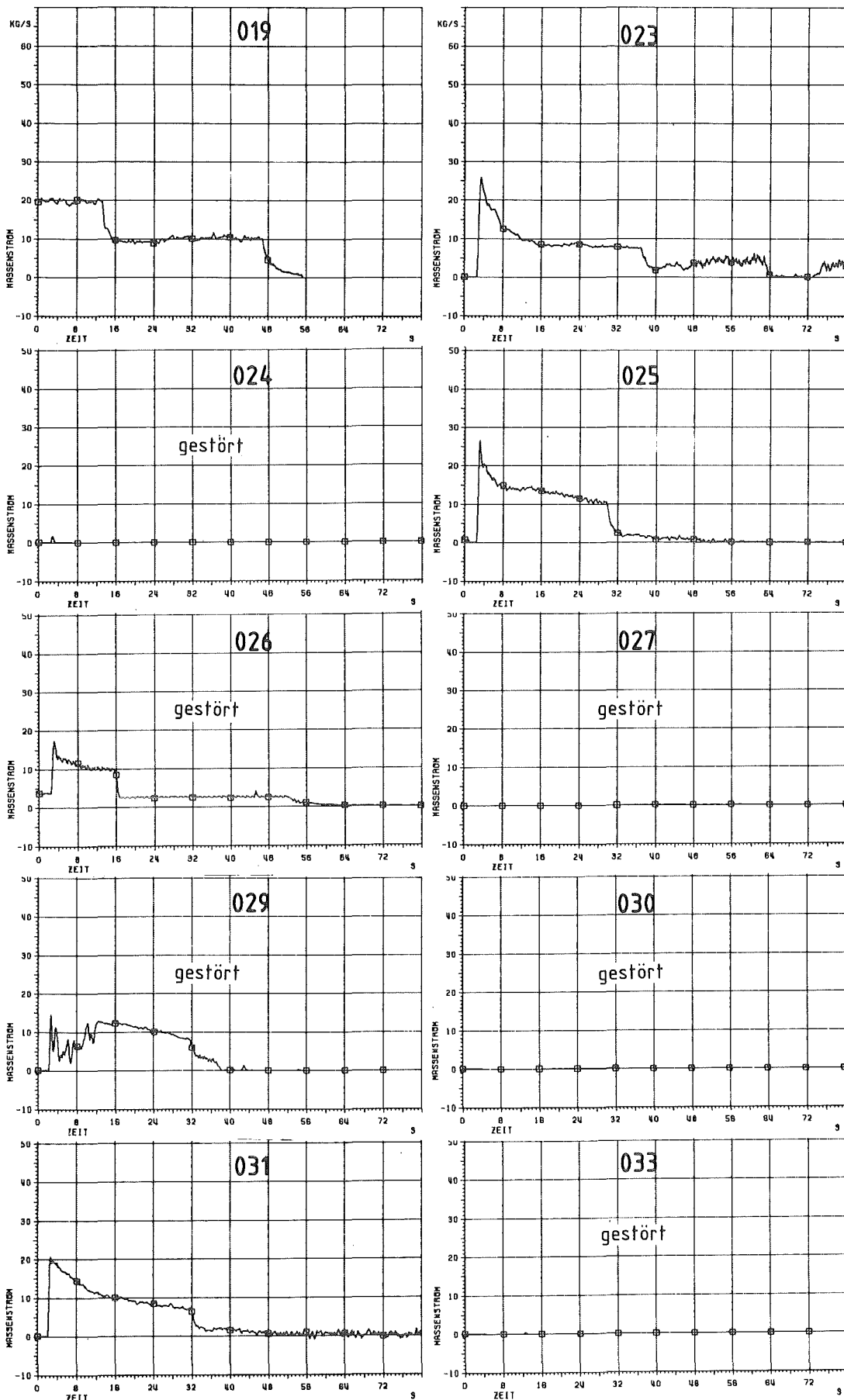


Abb. 24 Massenstrom aus QT2 und Desitometer DD in kg/s

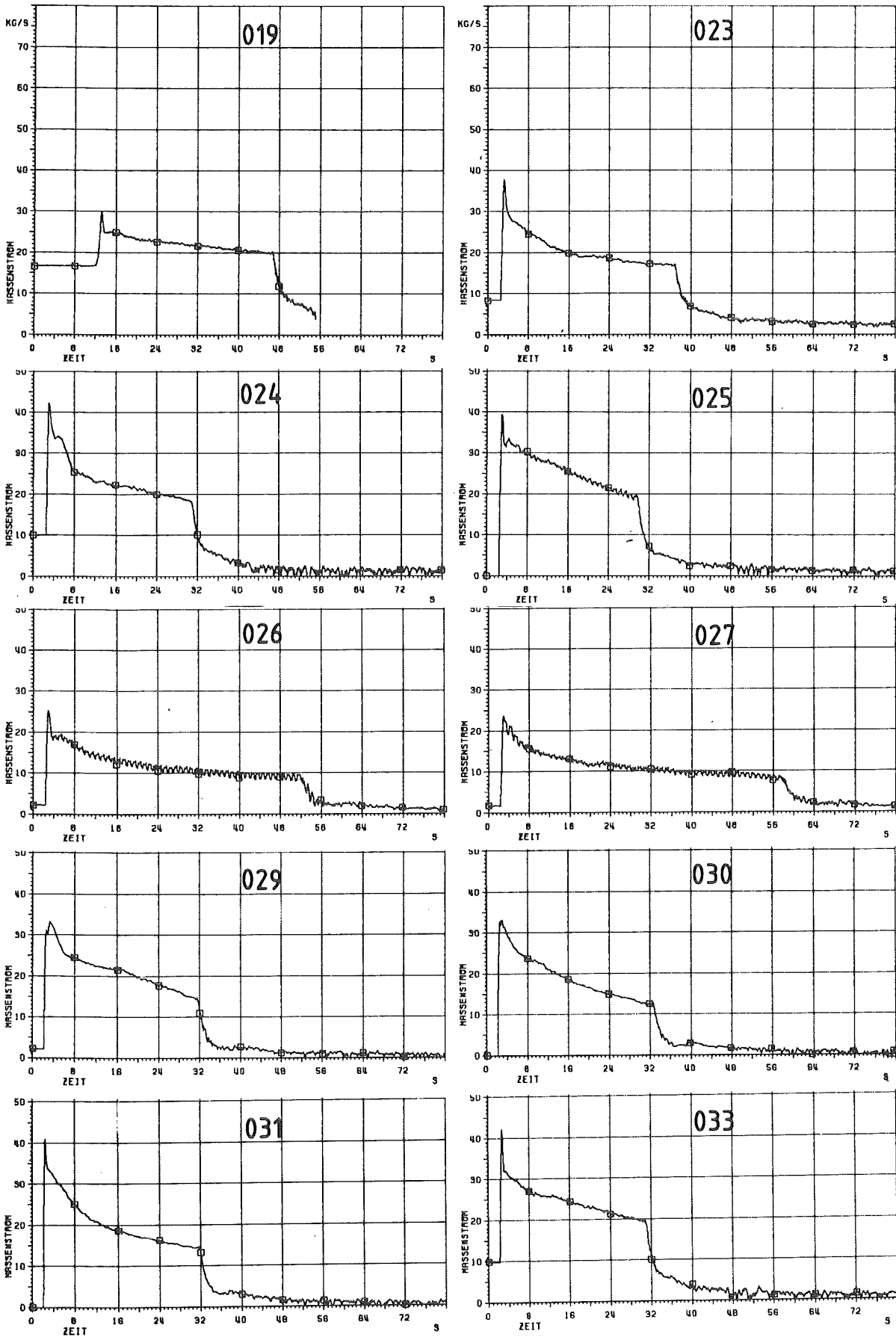


Abb.25 Massenstrom aus QD1 und Densitometer DD in kg/s

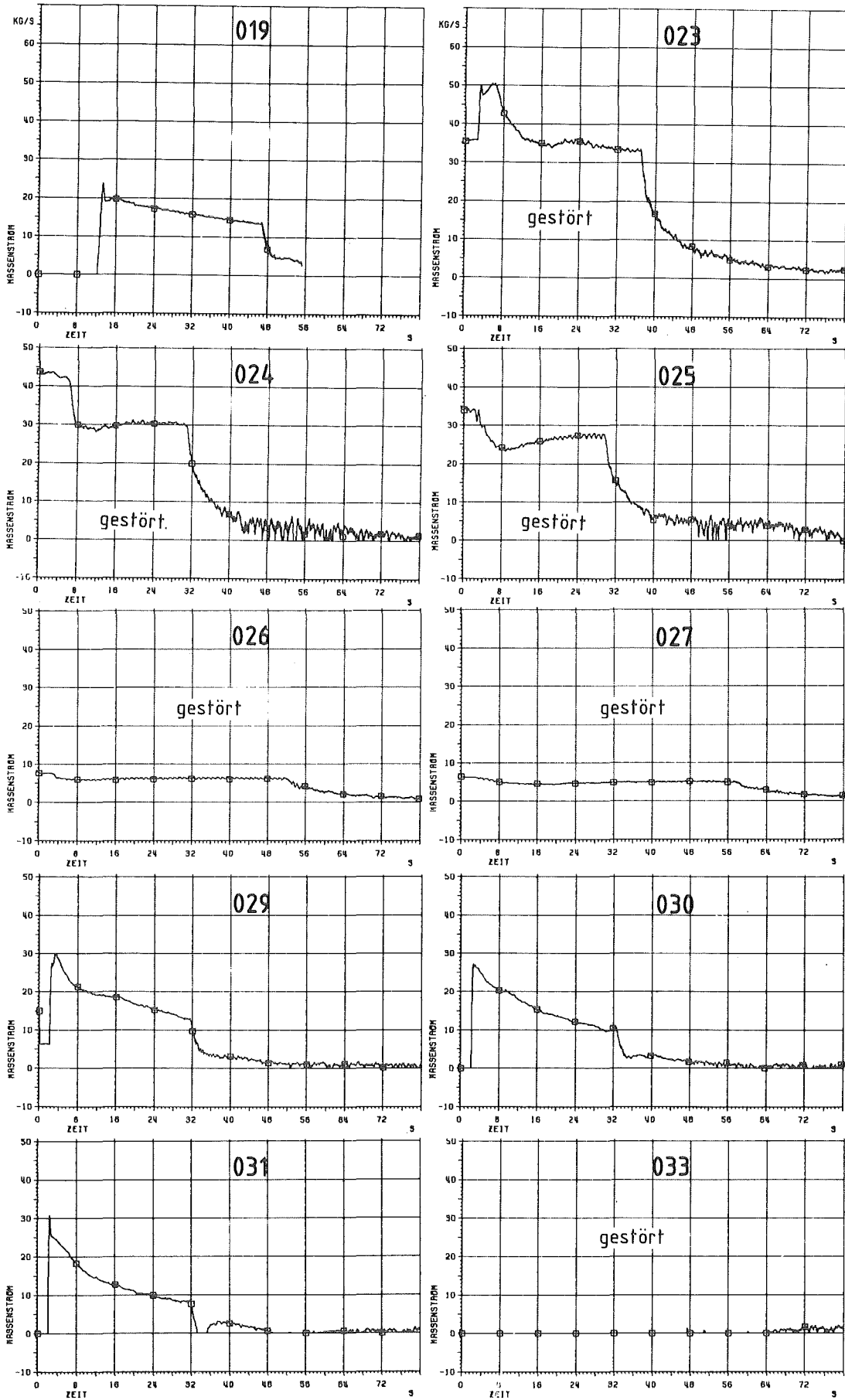


Abb. 26 Massenstrom aus Drag Body QD2 und Densitometer DD in kg/s

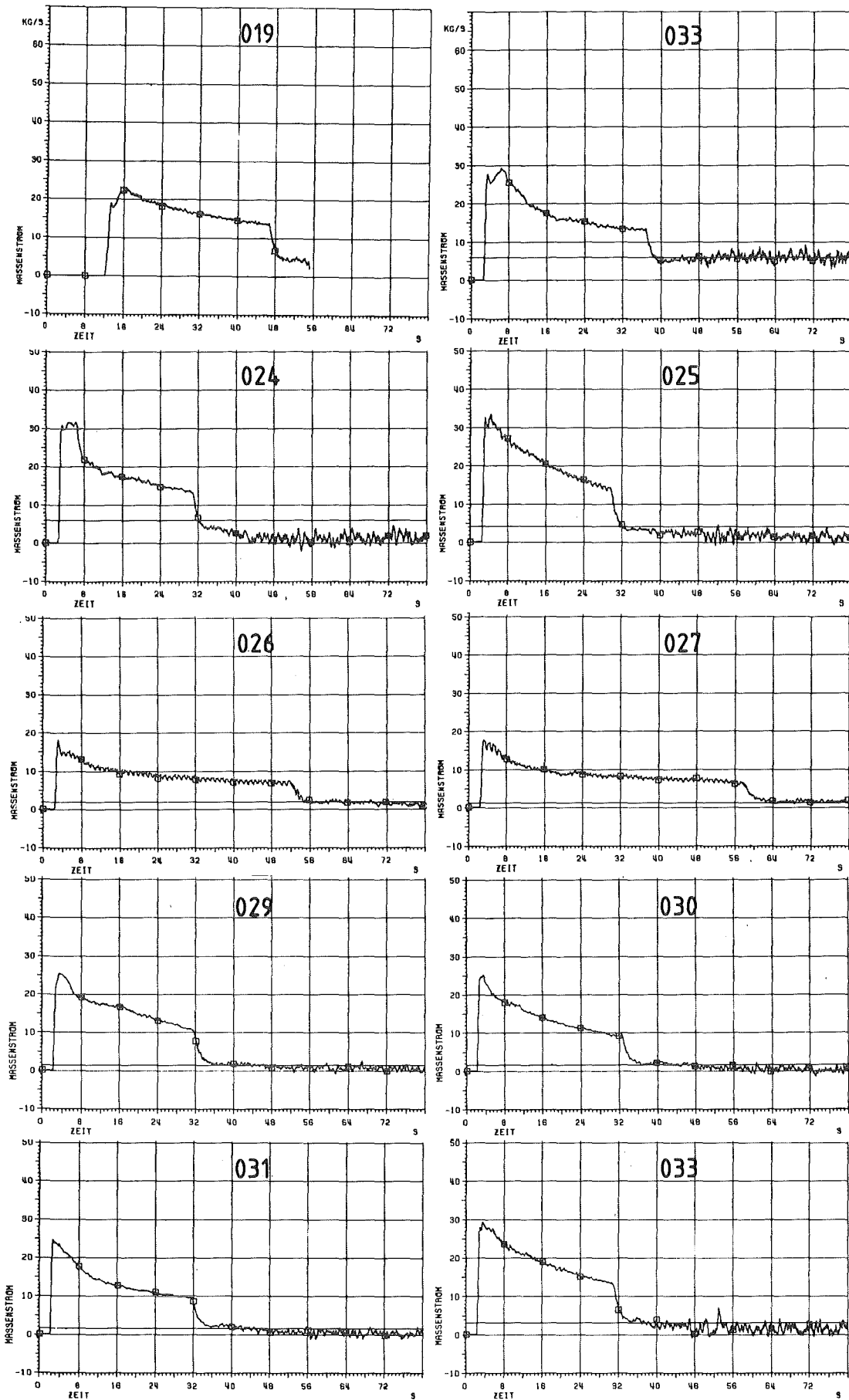


Abb.27 Massenstrom aus QF1 und Densitometer DD in kg/s

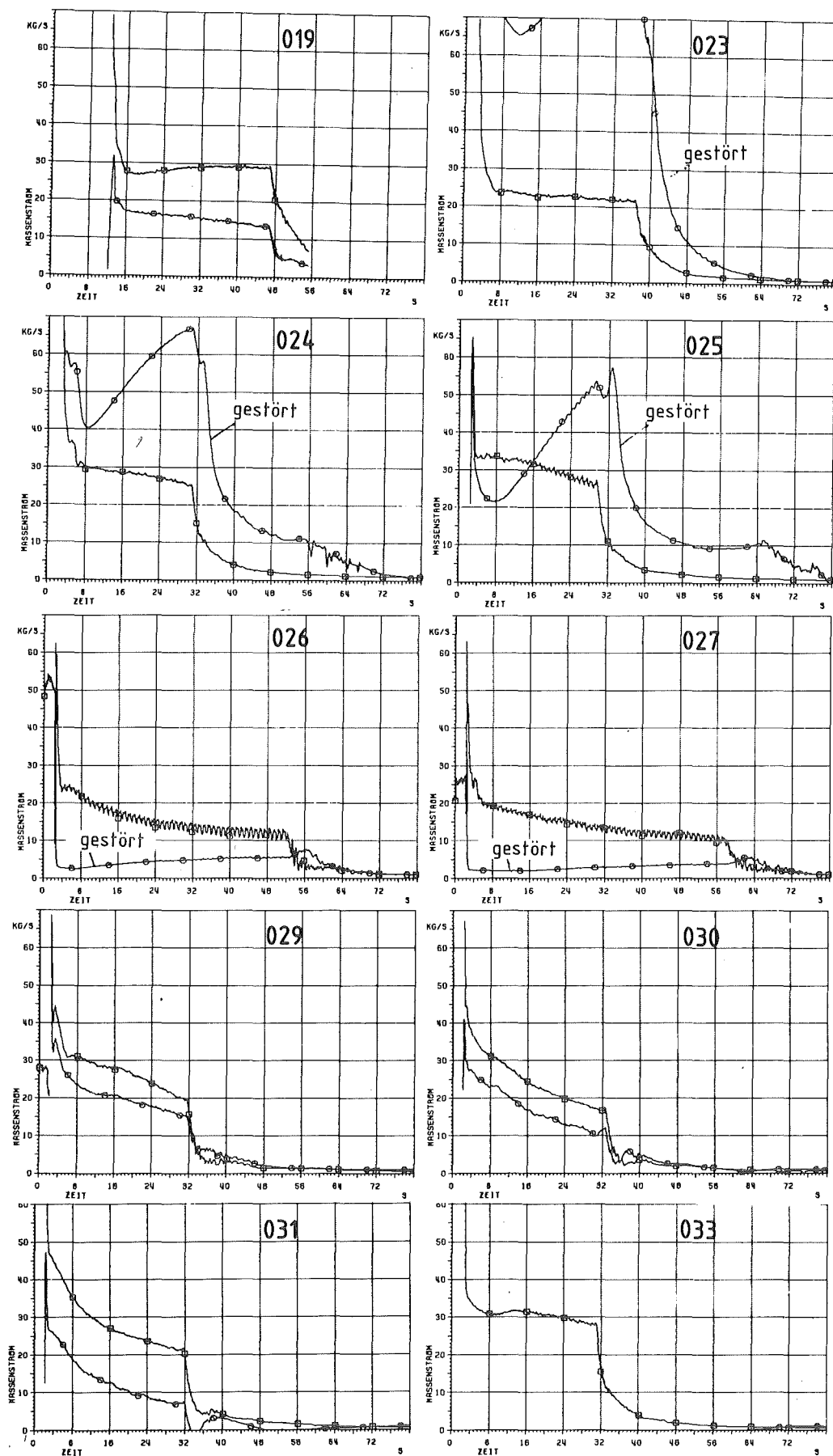


Abb. 28 Massenstrom aus QD1 und QF1 (□) und QD2 und QF1 (○) in kg/s

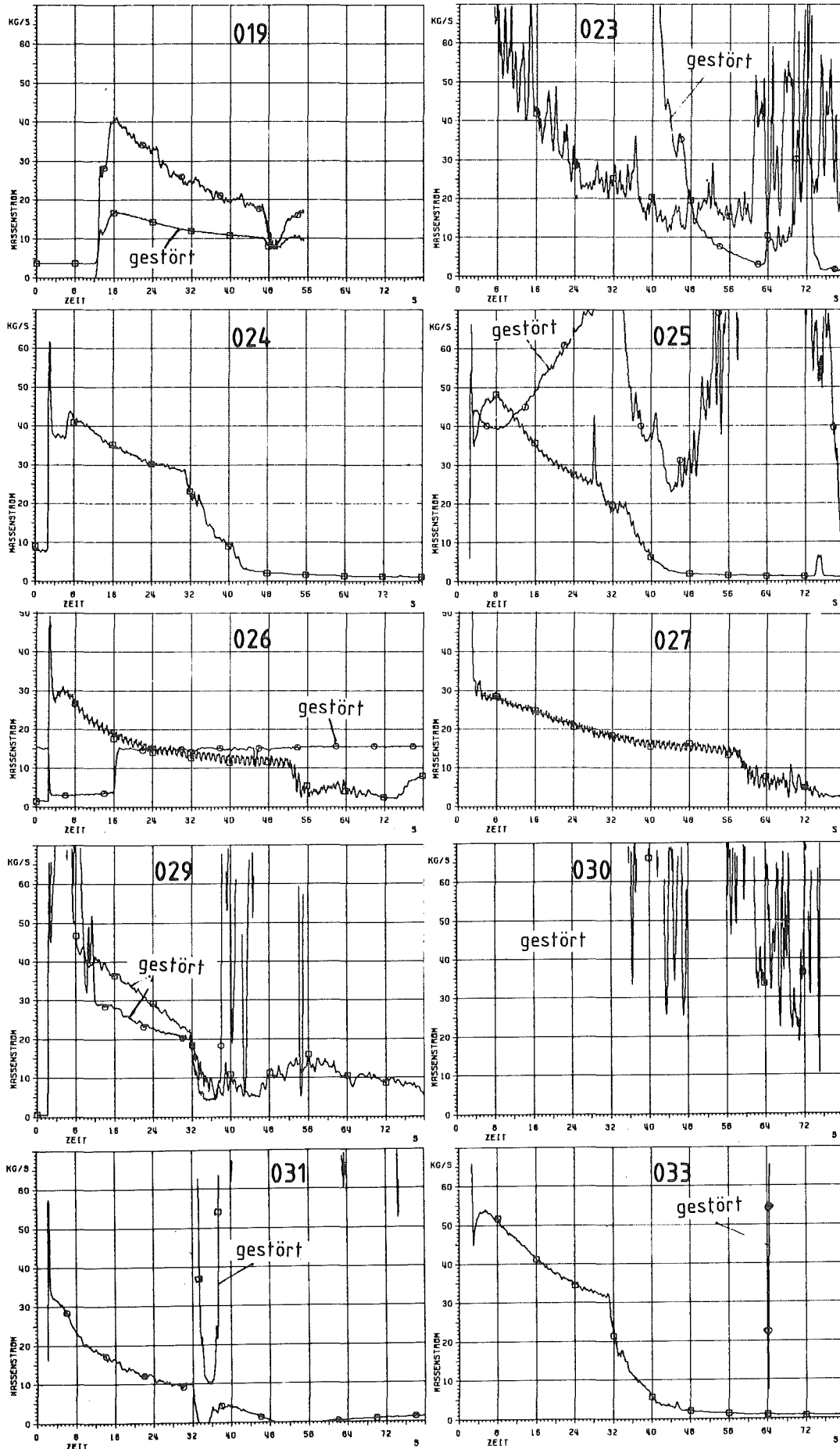


Abb. 29 Massenstrom aus QD1 und QT1 (□)
und QD2 und QT2 (○)

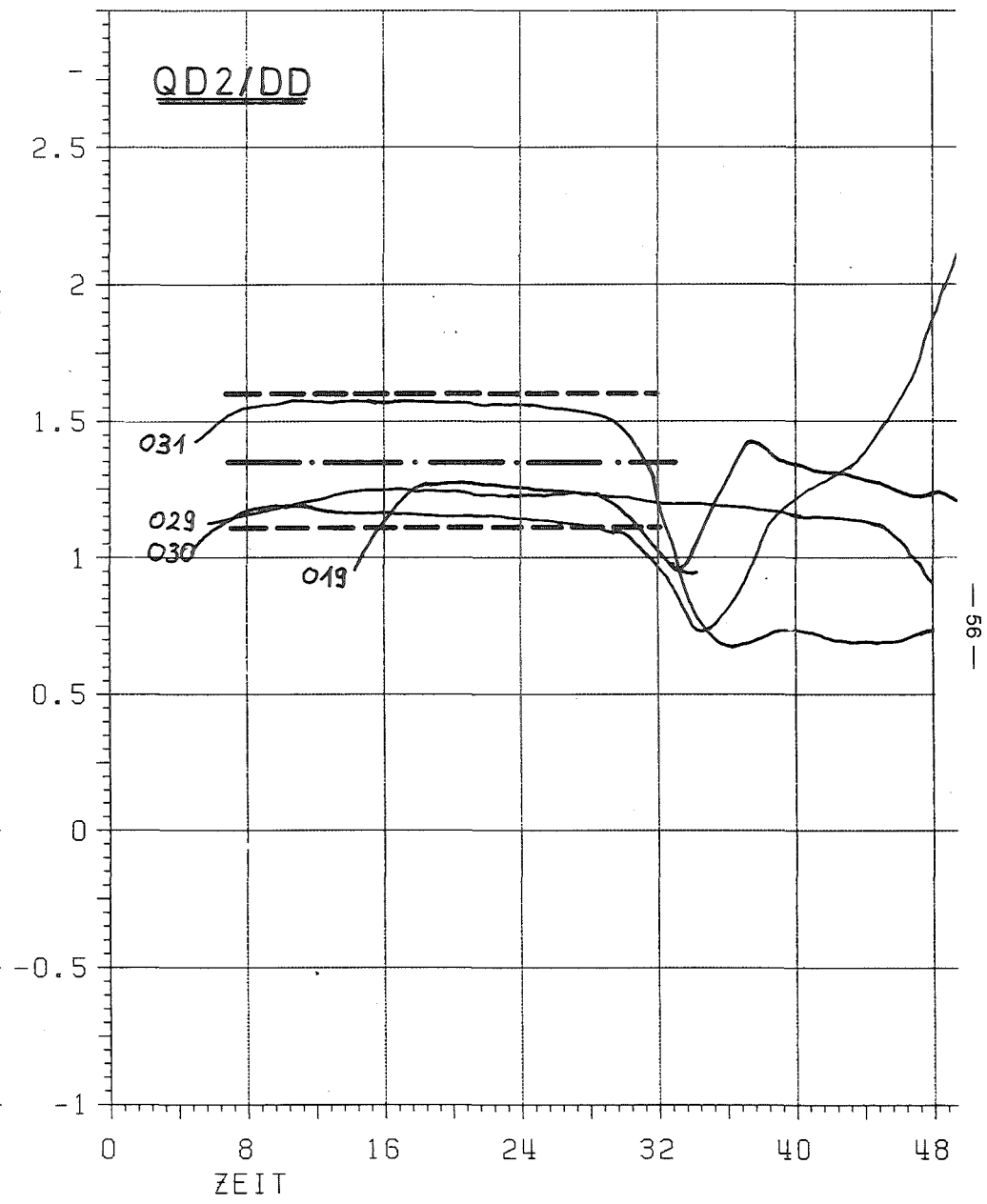
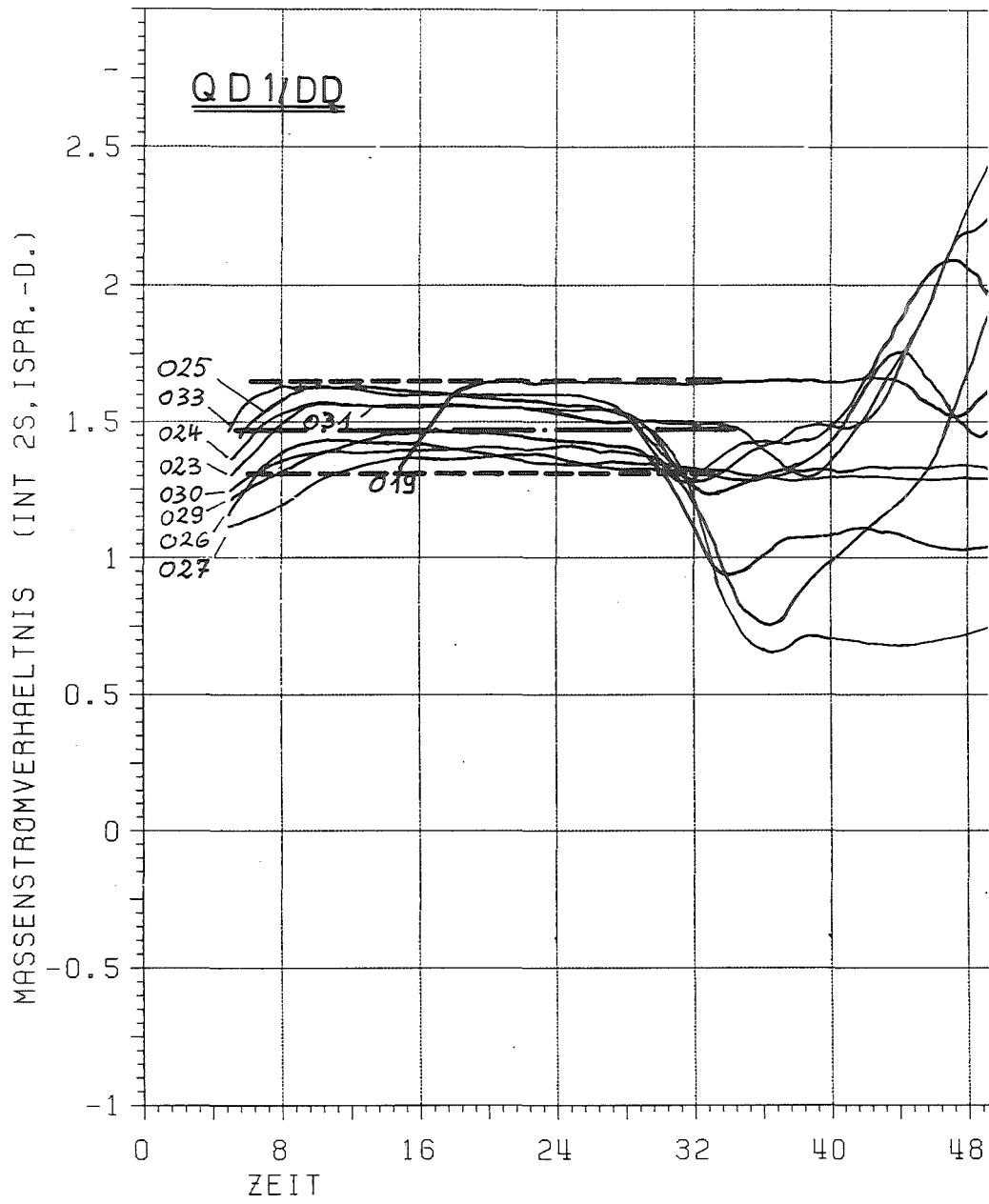


ABB. : 30

MASSENSTROMVERHAELTNIS ZU TMFM

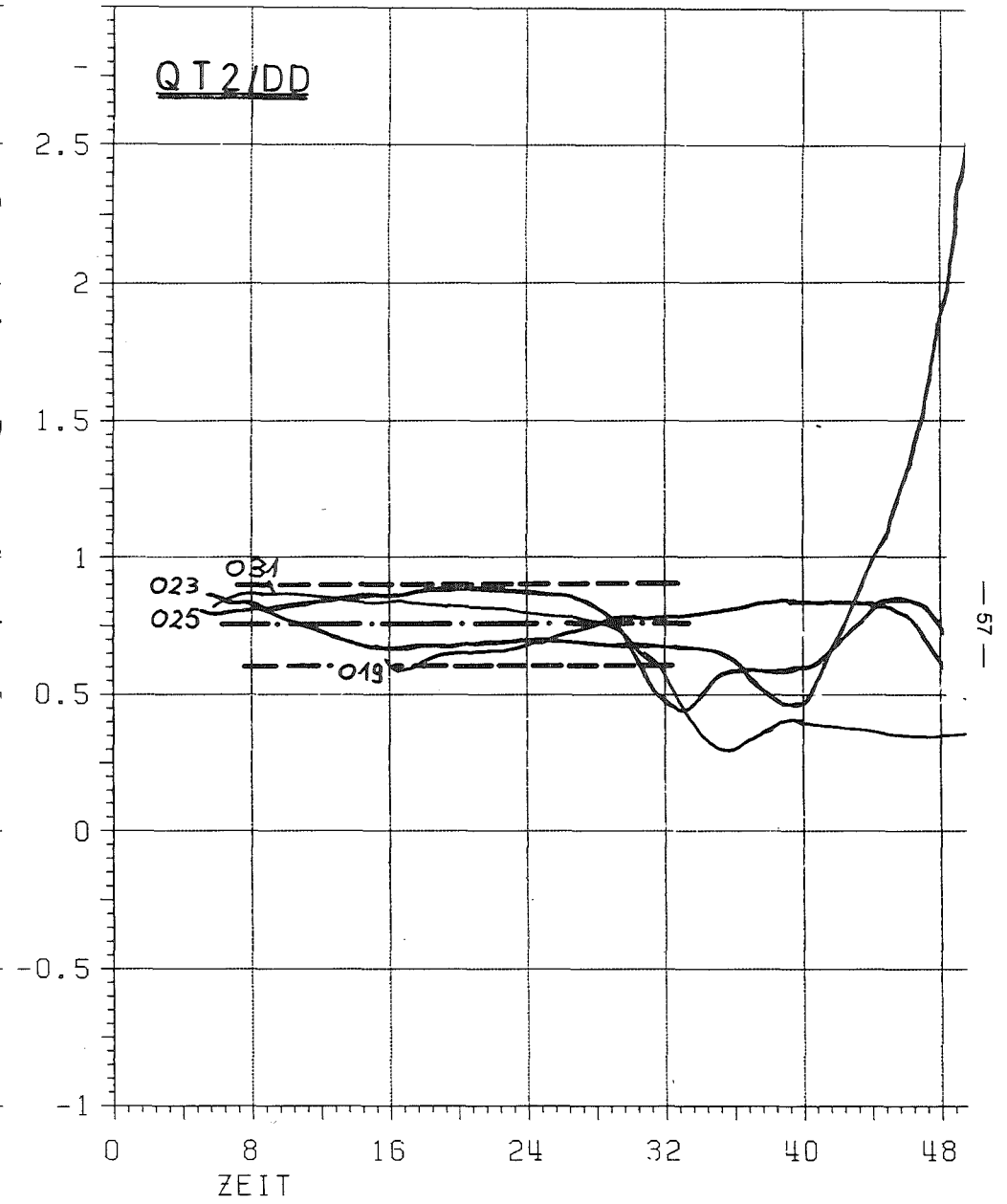
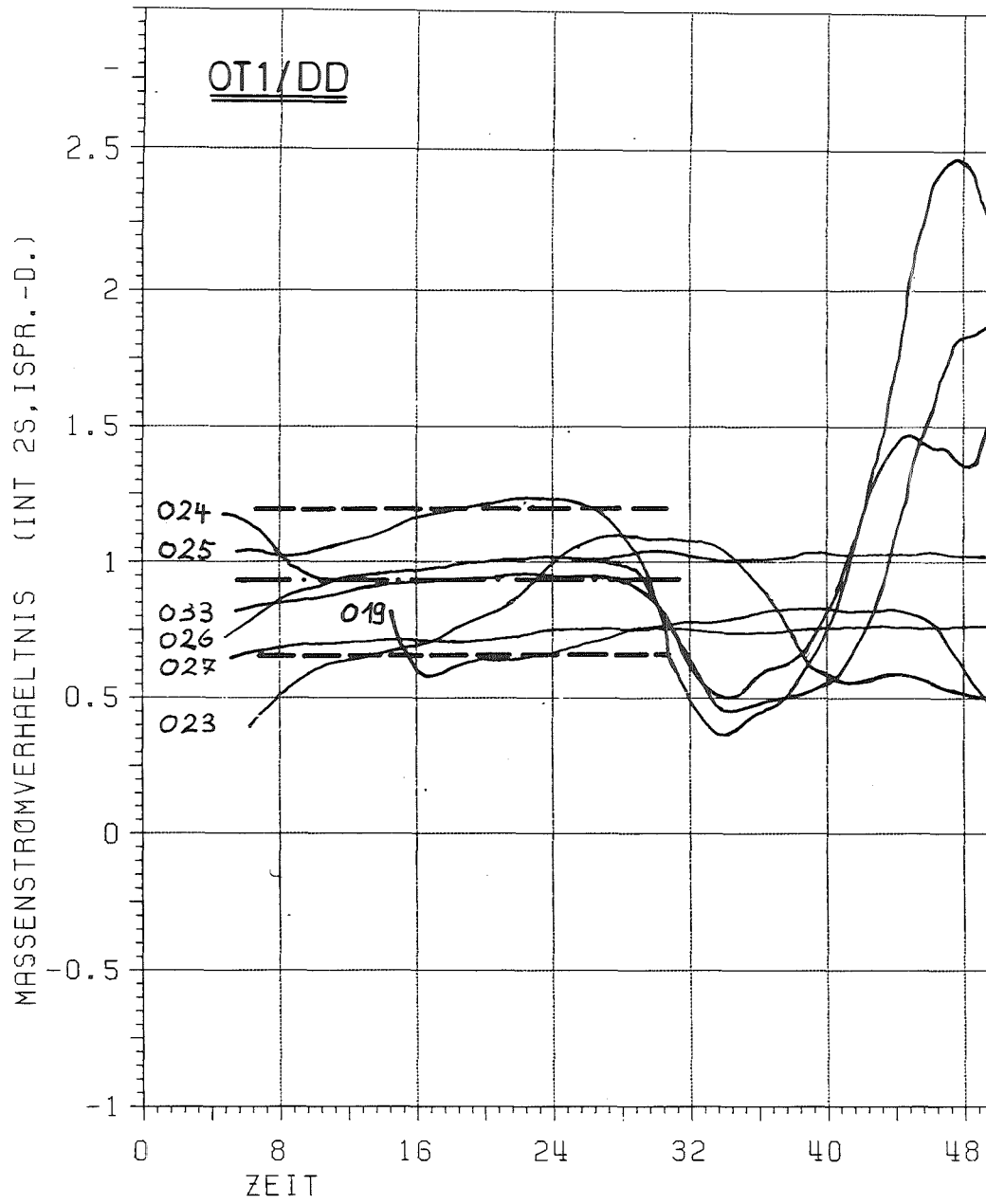


ABB.: 31

MASSENSTRÖMVERHÄLTNIS ZU TMFM

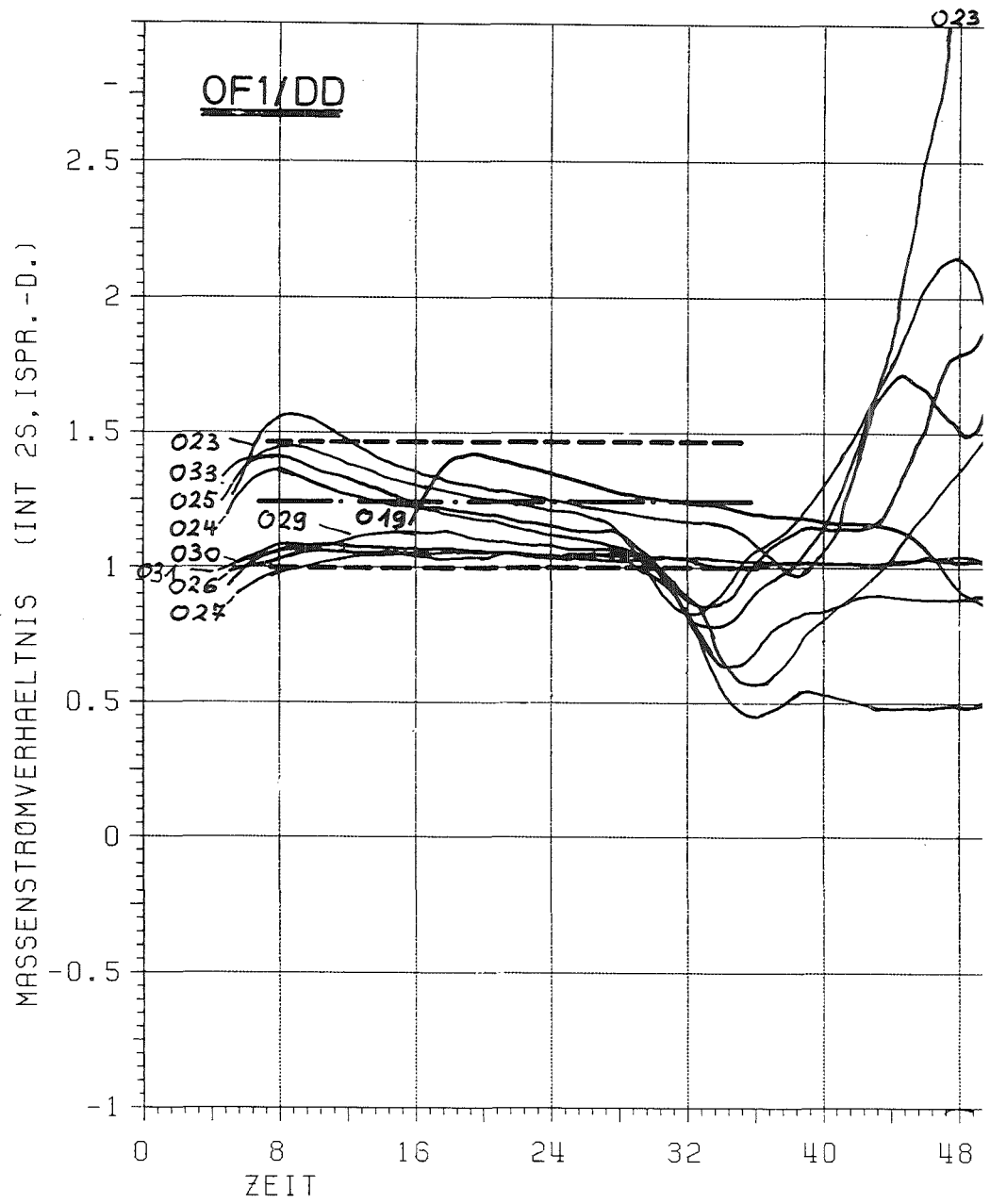


ABB. : 32

MASSENSTRÖMVERHÄLTNIS ZU TMFM

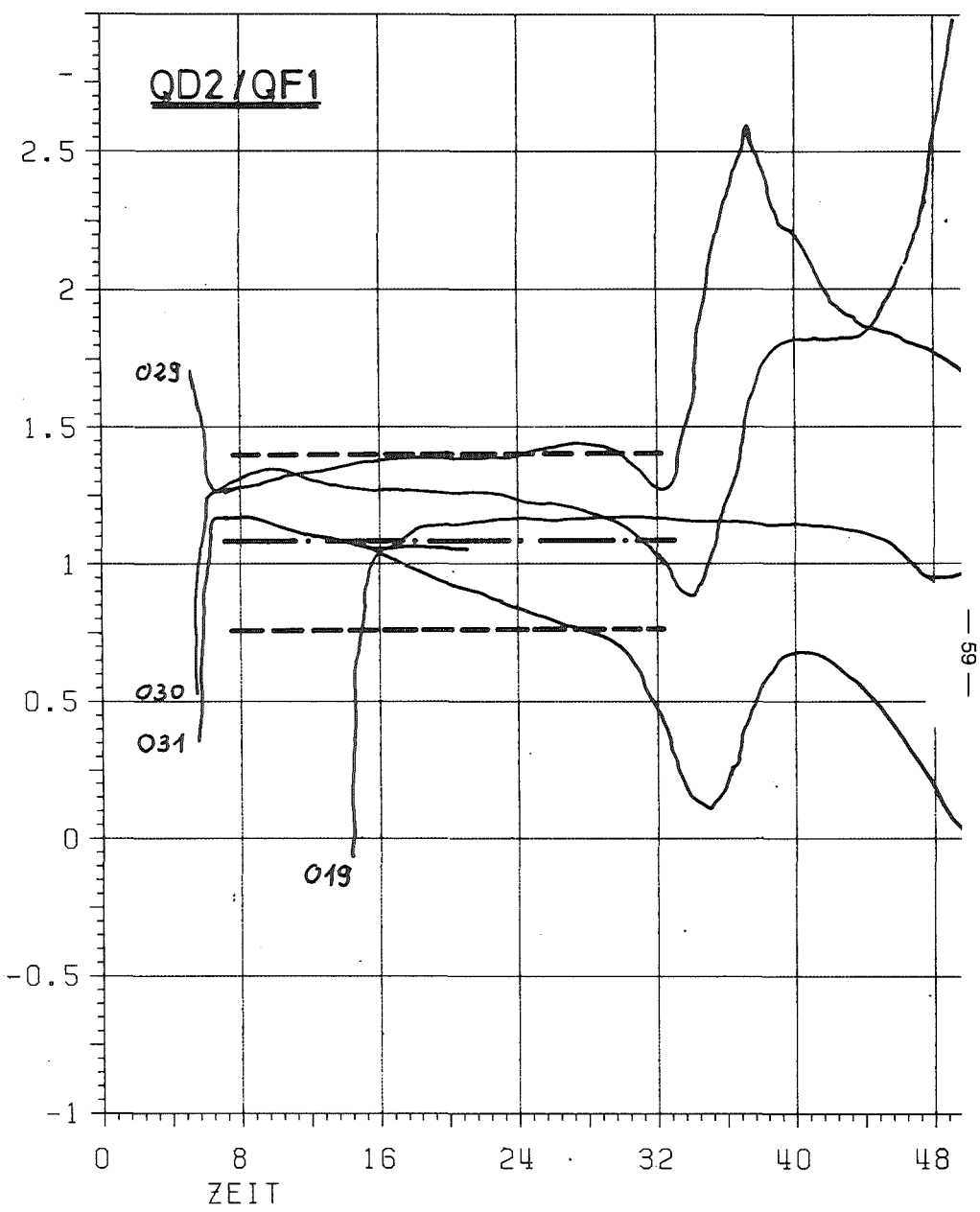
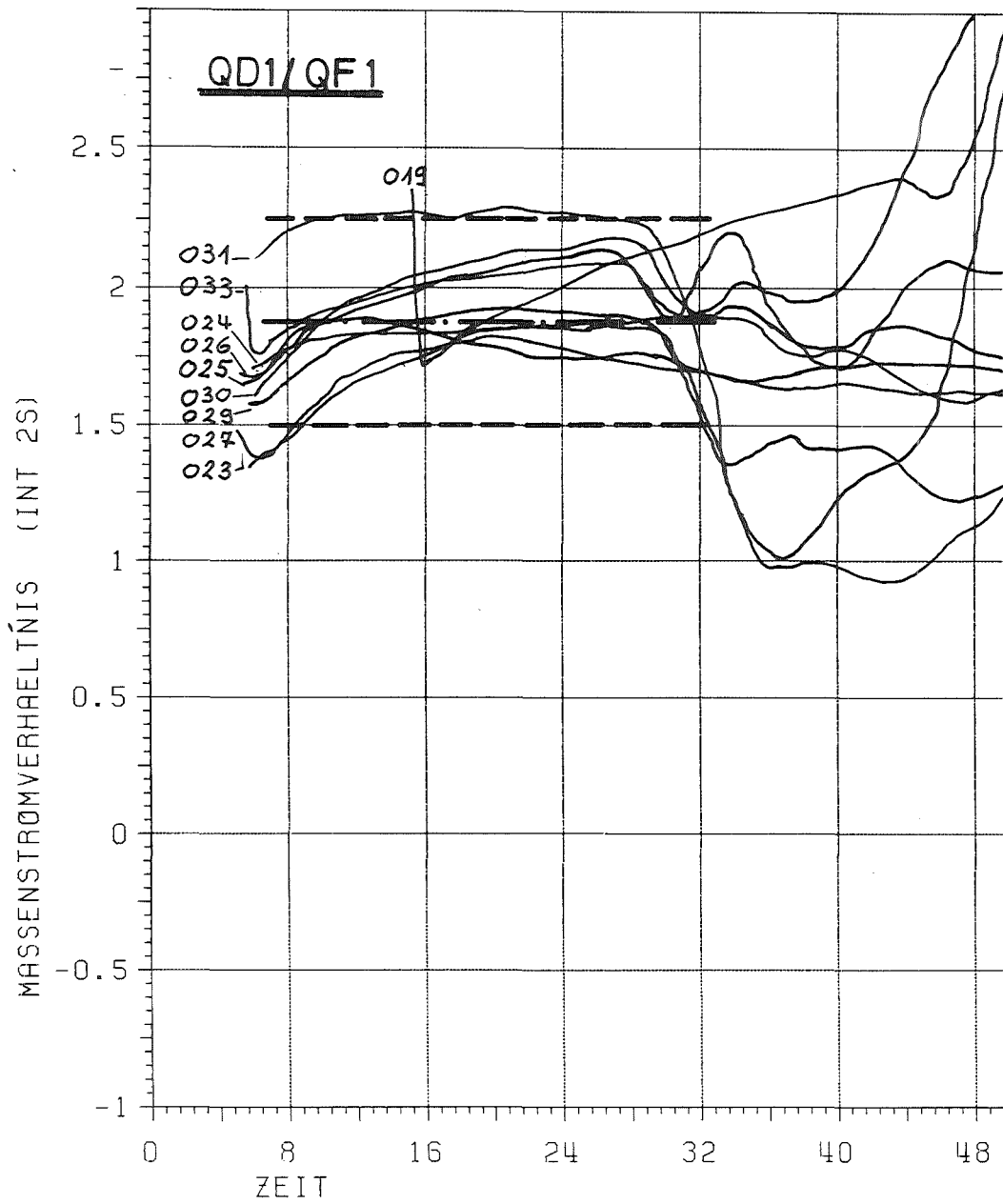


ABB. 33 MASSENSTROMVERHÄLTNIS ZU TMFM

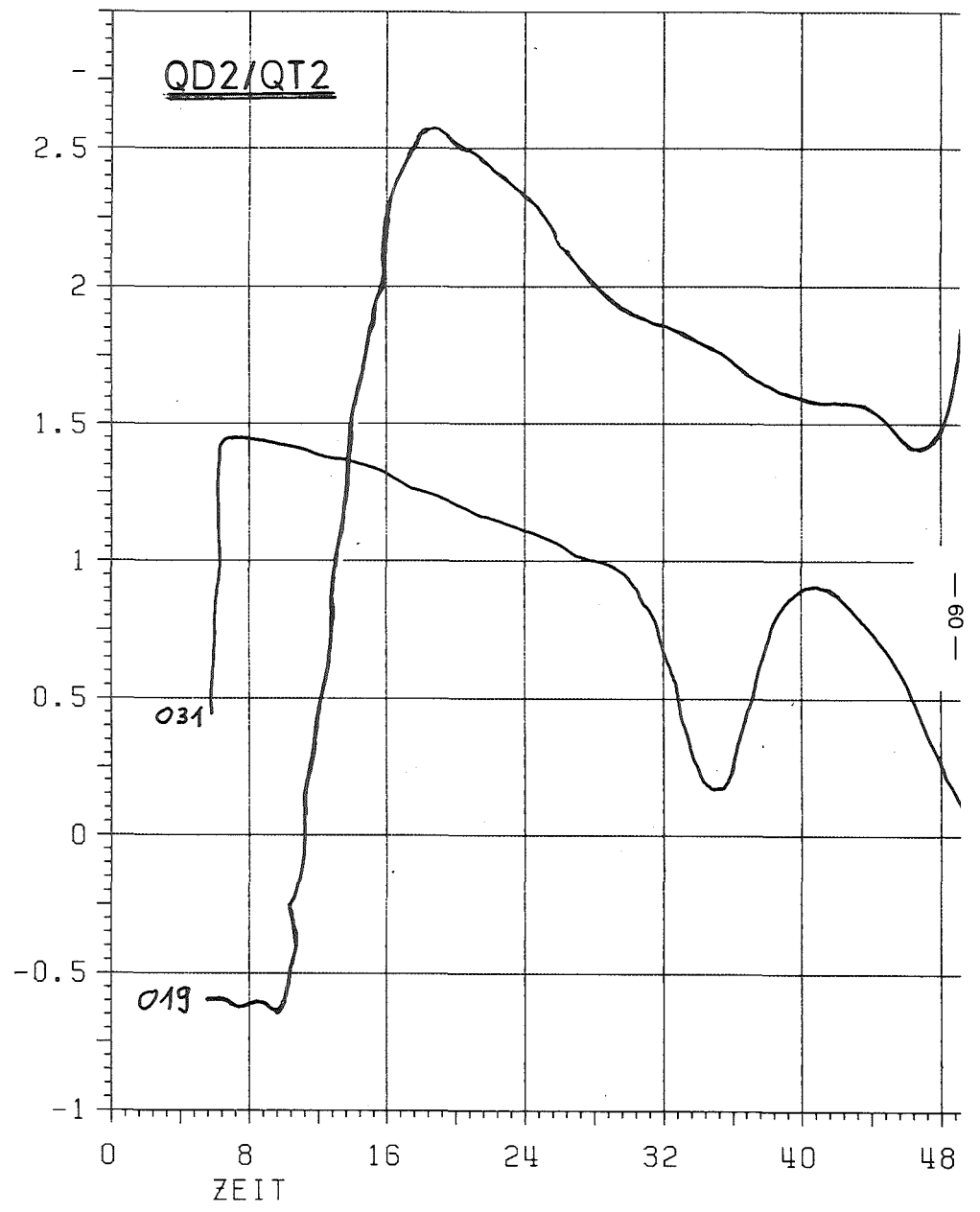
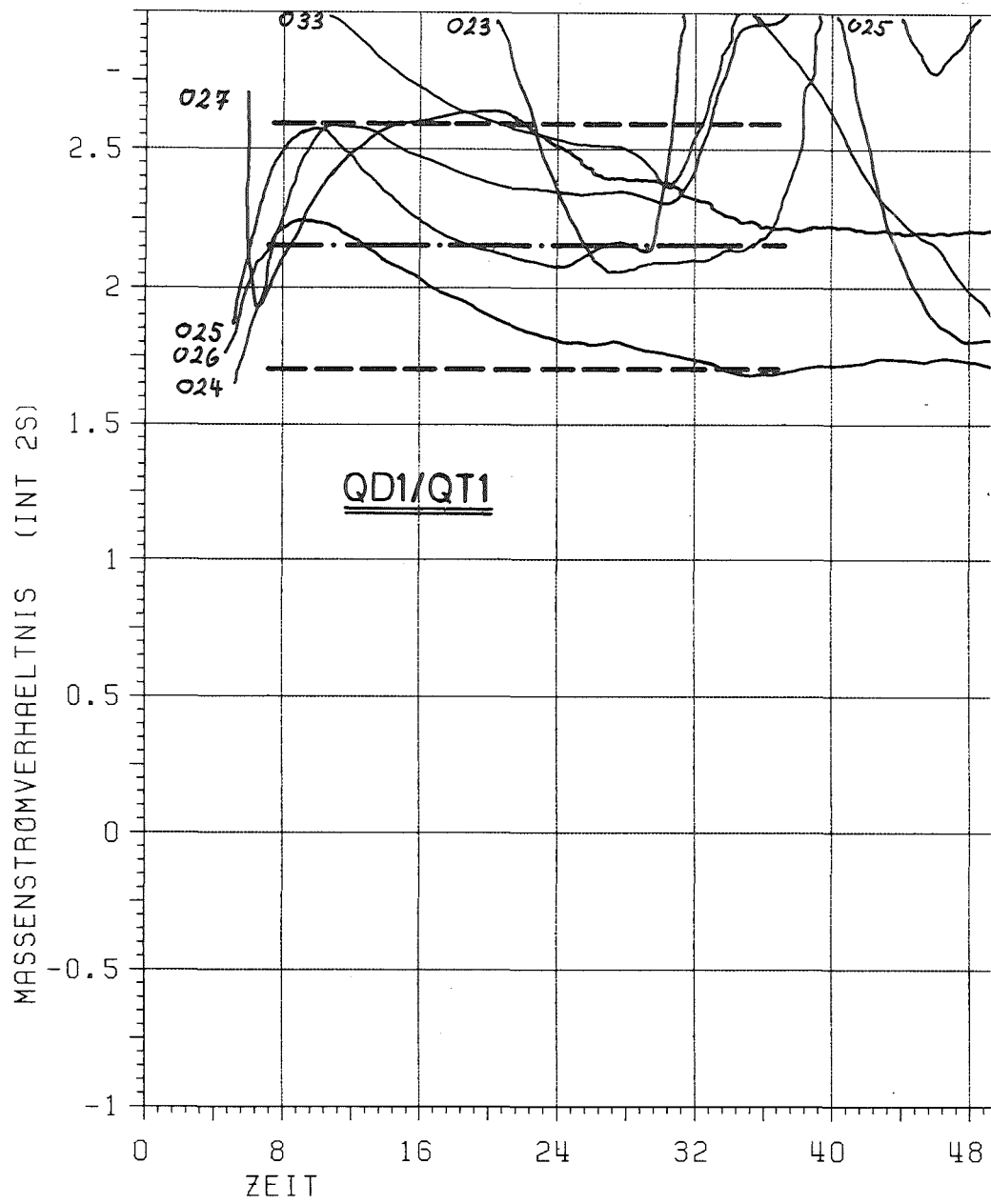


ABB. : 34 MASSENSTRÖMVERHÄLTNIS ZU TMFM

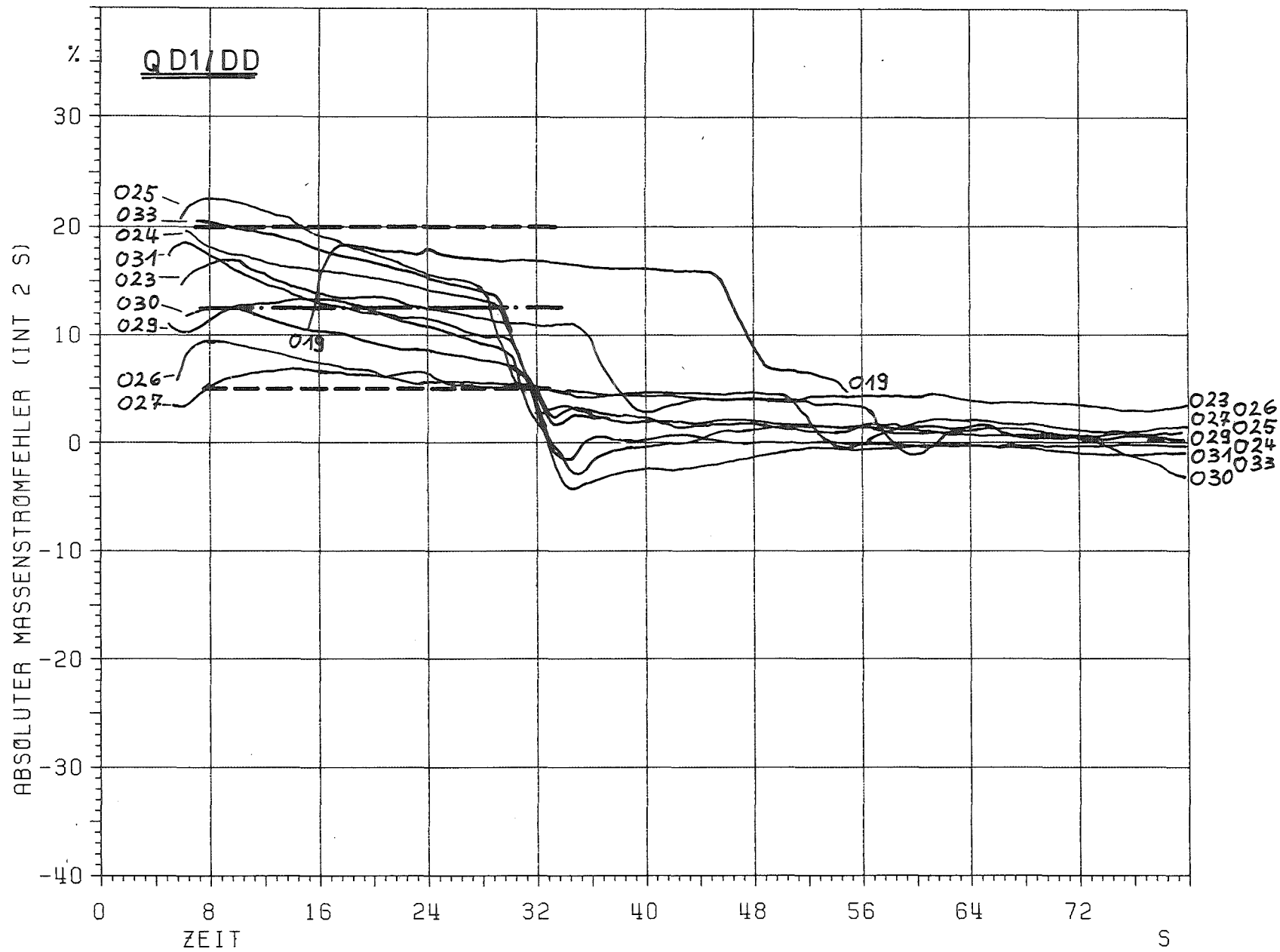


ABB.: 35 ABS. MASSENSTROMFEHLER BEZ. AUF 50 KG/S

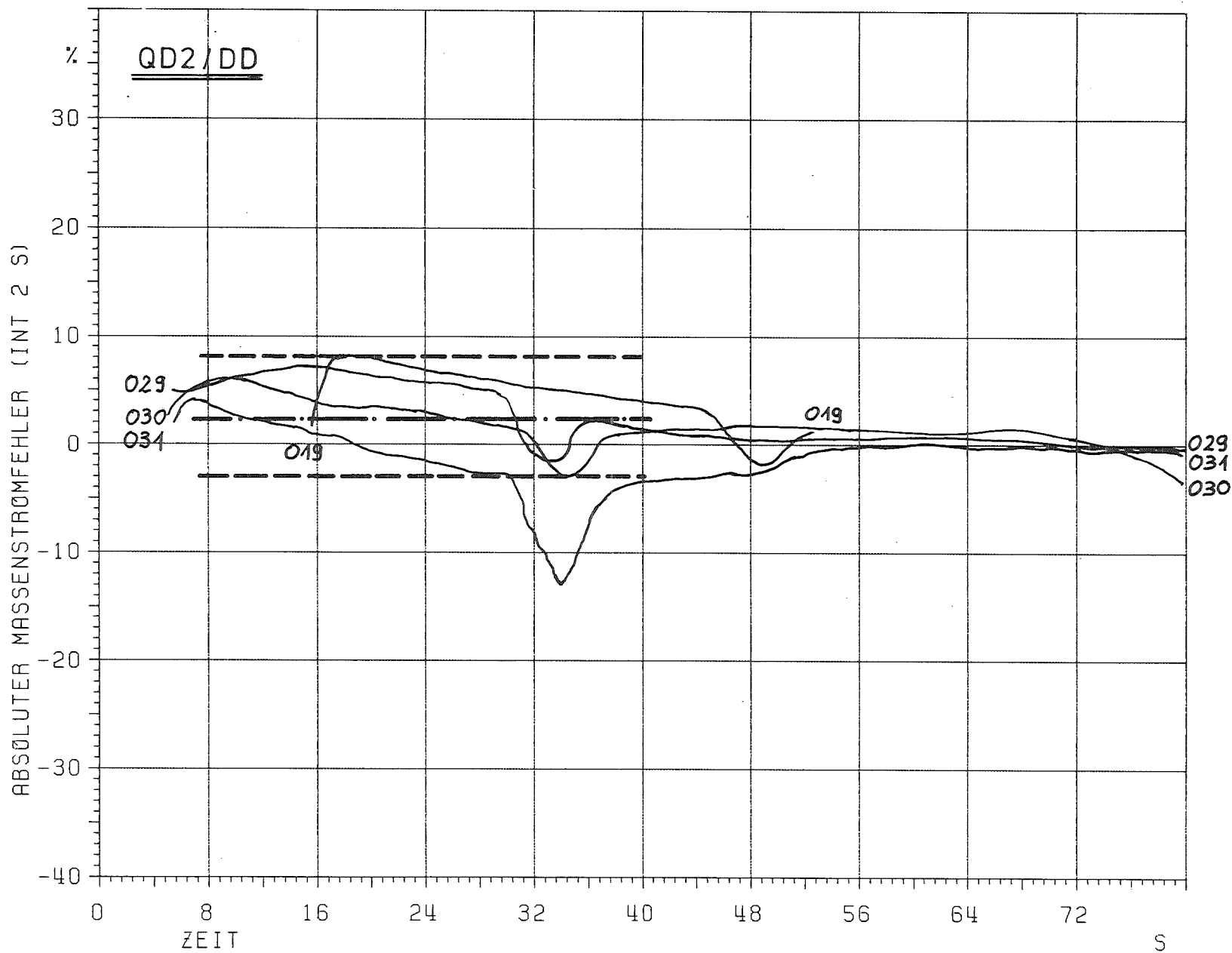


ABB.: 36 ABS. MASSENSTRÖMFEHLER BEZ. AUF 50 KG/S

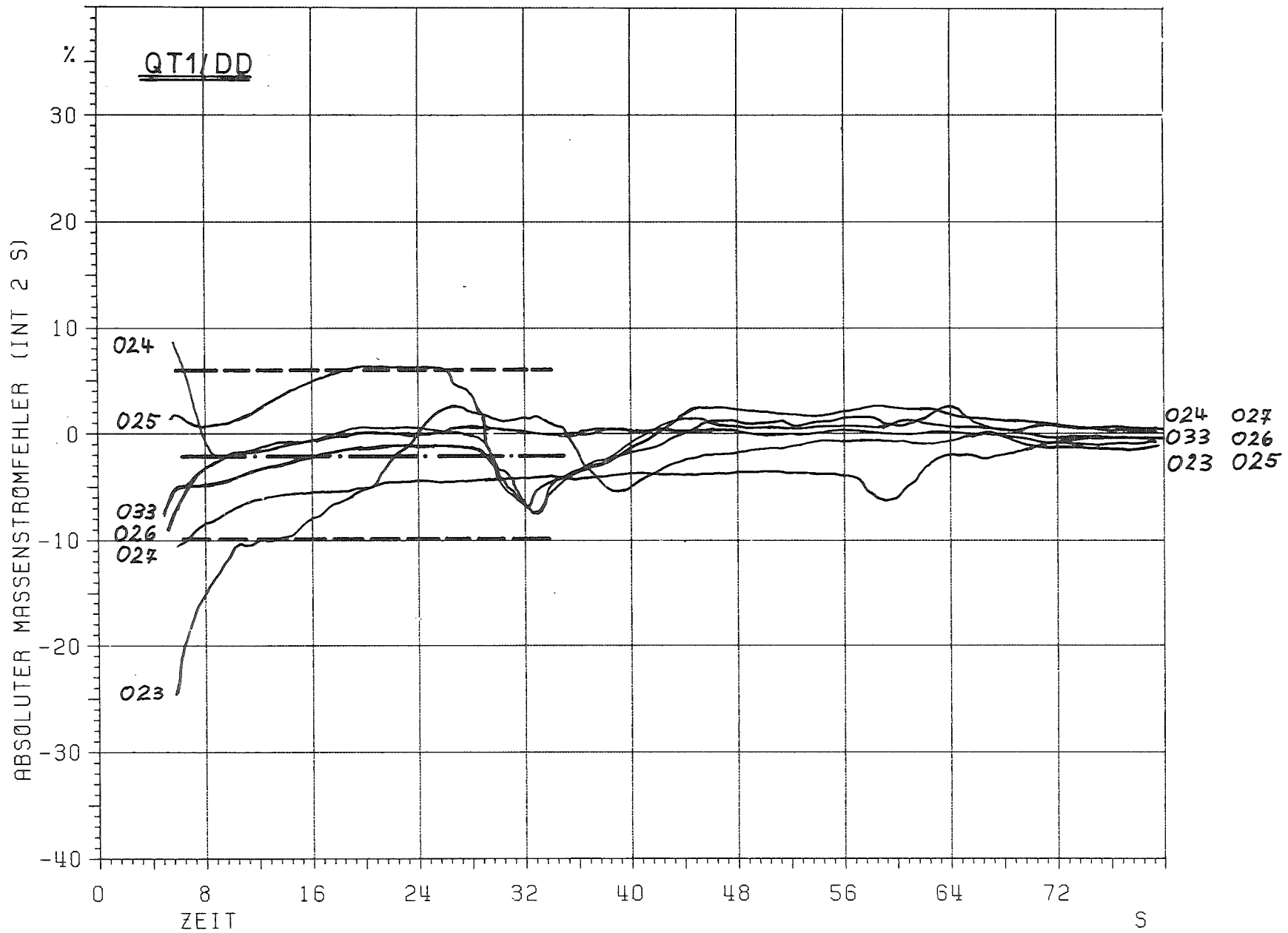


ABB.: 37 ABSOLUTER MASSENSTROMFEHLER (BEZ. AUF 50 KG/S)

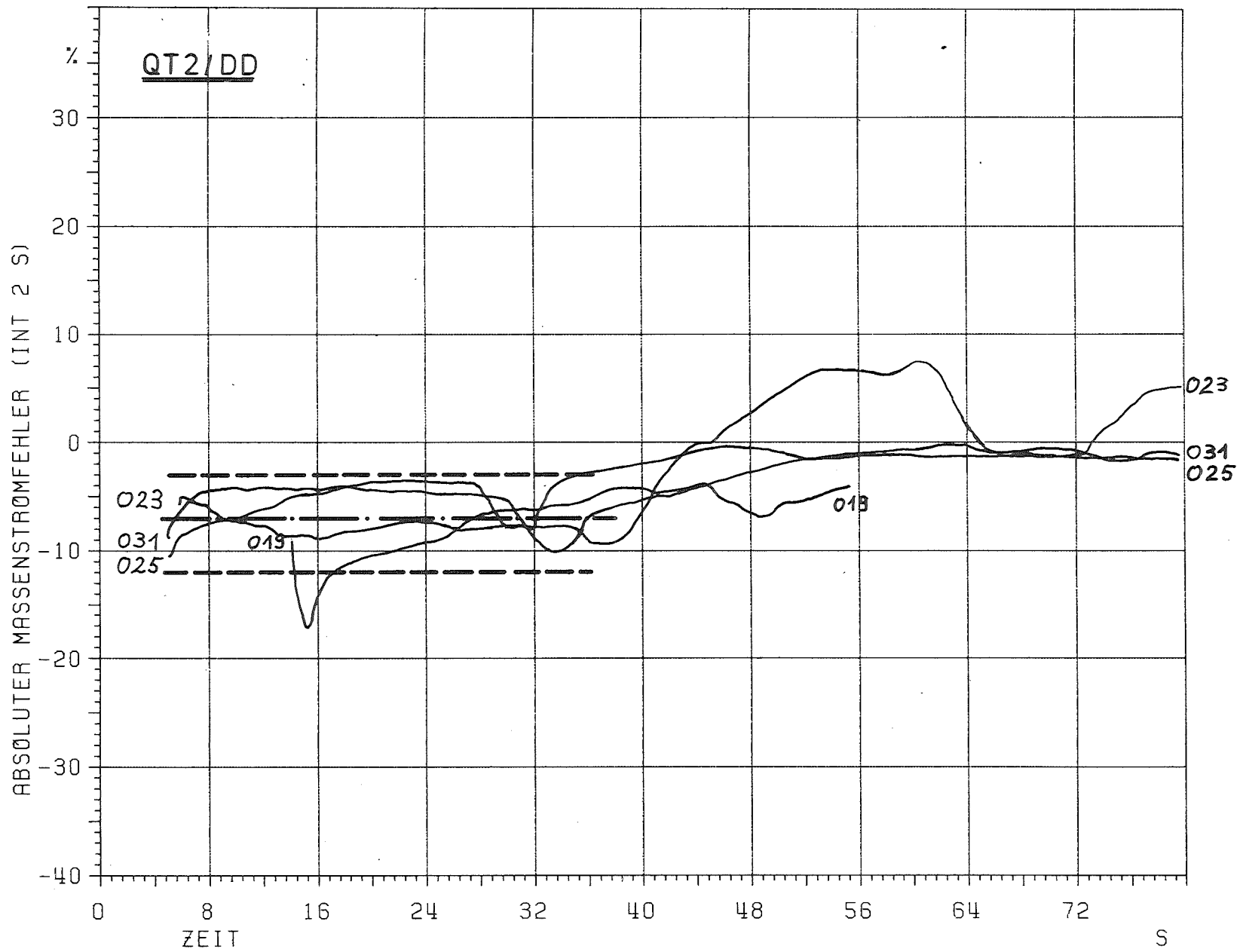


ABB.: 38

ABSÖLUTER MASSENSTRÖMFEHLER (BEZ. AUF 50 KG/S)

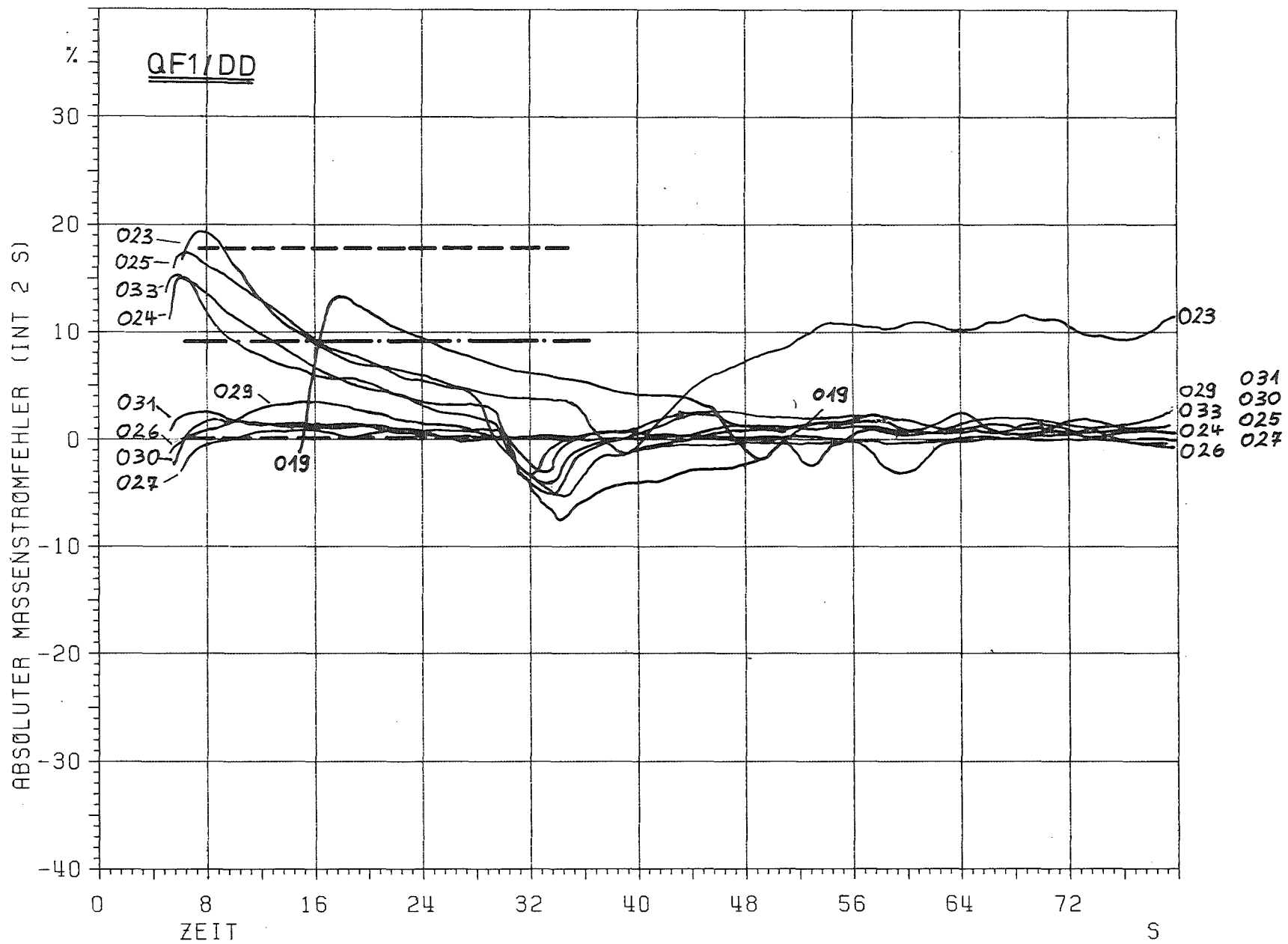


ABB.: 39

ABS. MASSENSTROMFEHLER BEZ. AUF 50 KG/S

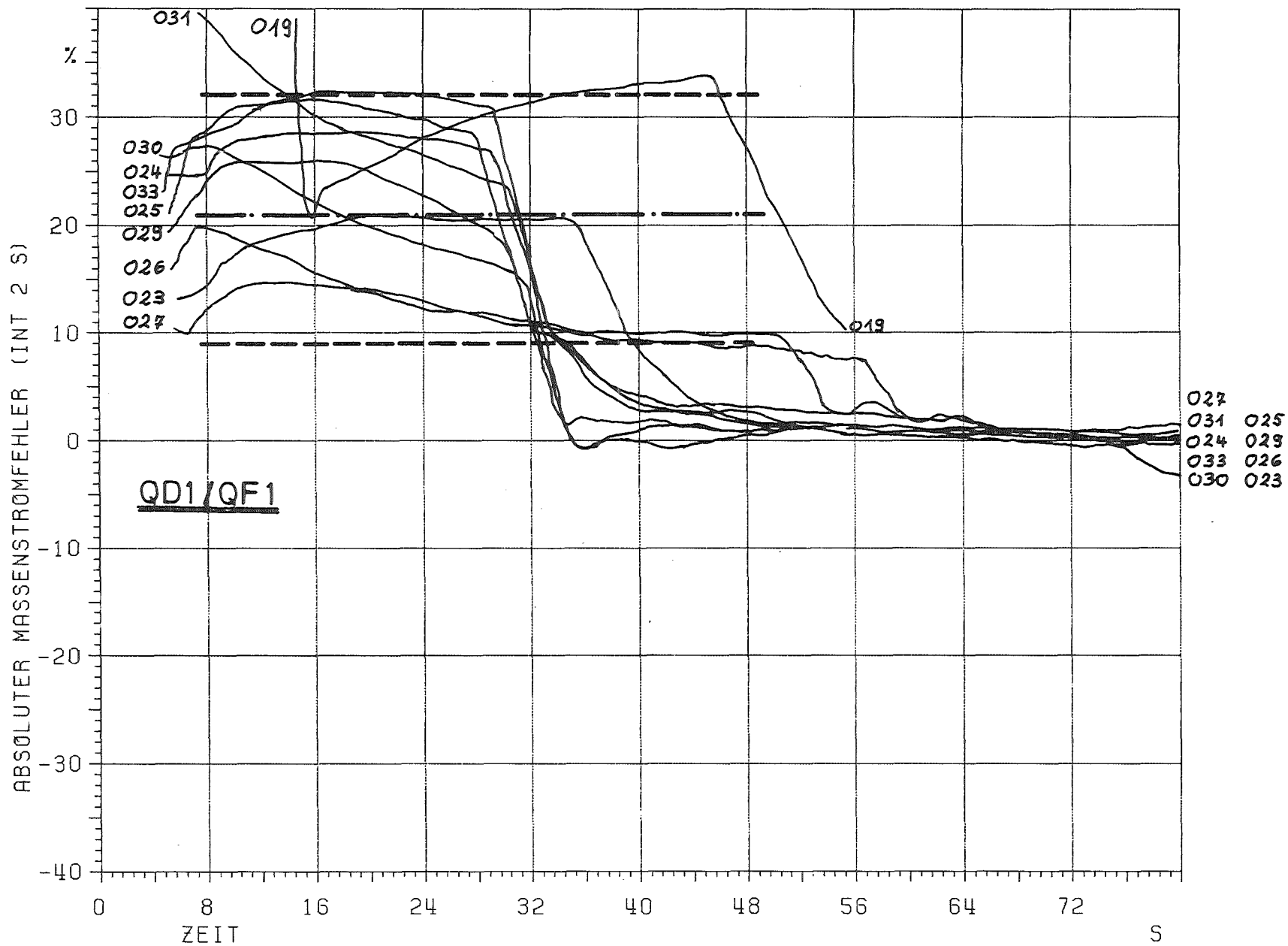


ABB. : 40 ABS.MASSENSTROMFÄHLER (BEZ. AUF 50 KG/S)

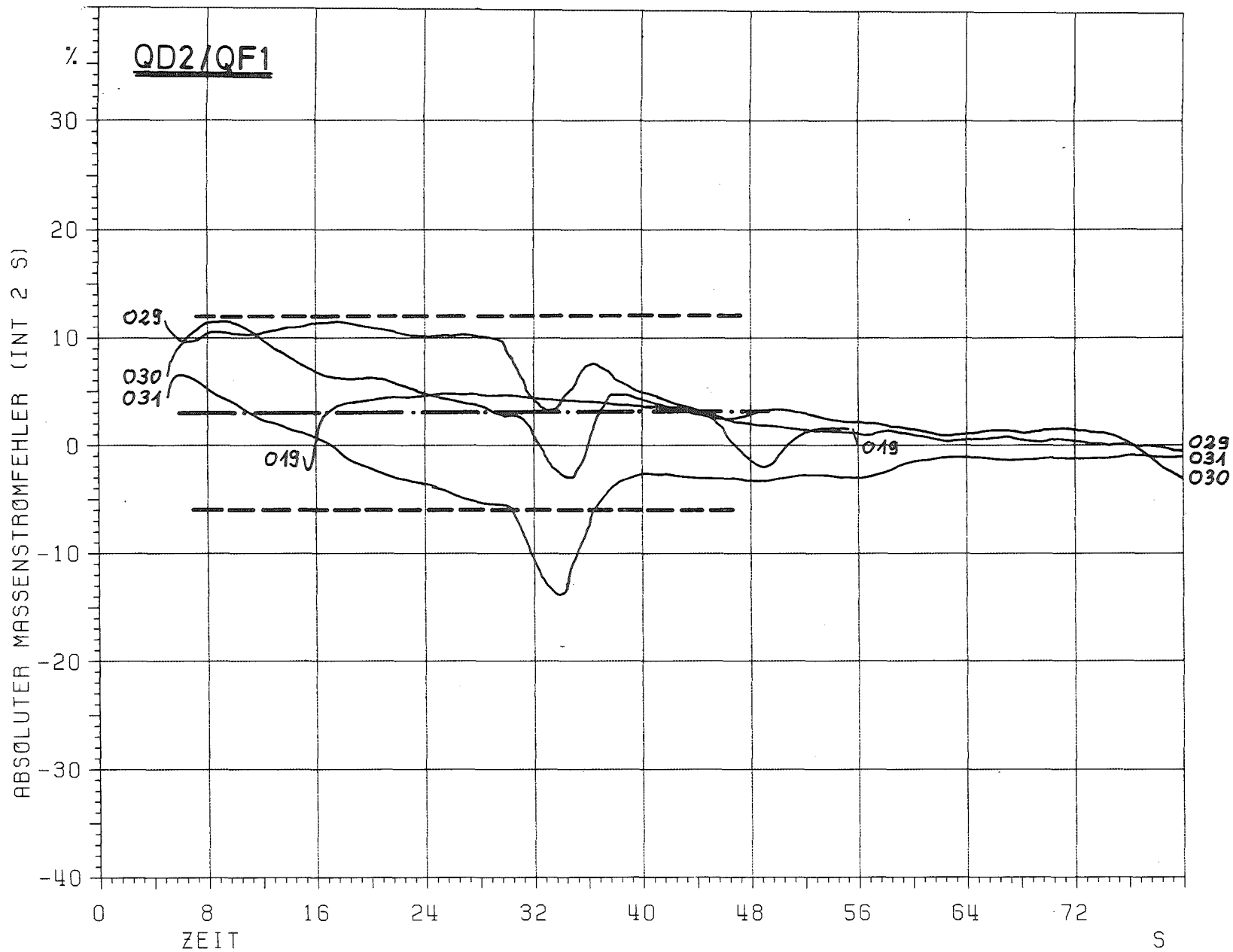


ABB.: 41 ABS. MASSENSTROMFEHLER (BEZ. AUF 50 KG/S)

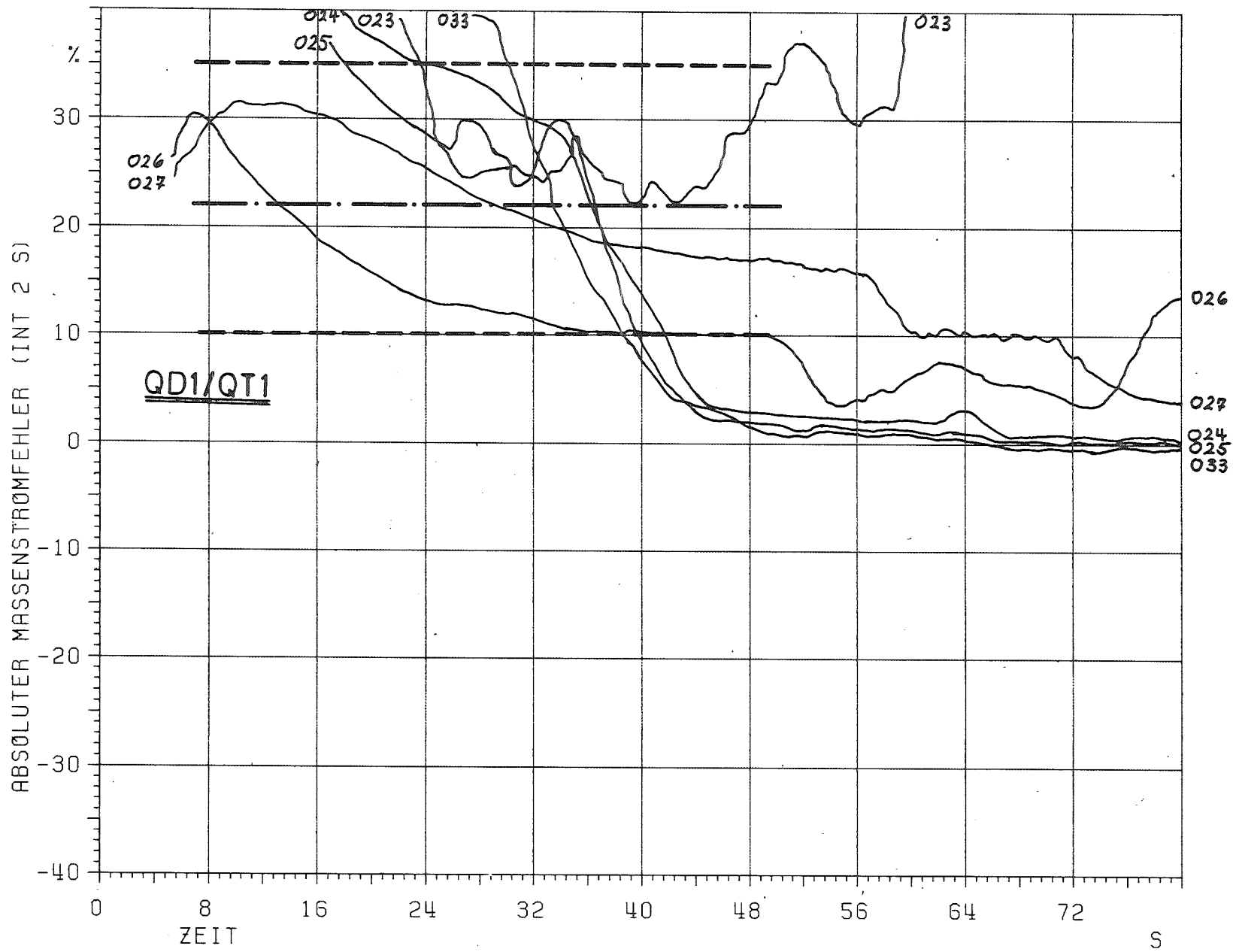


ABB.: 42 ABS. MASSENSTROMFEHLER (BEZ. AUF 50 KG/S)

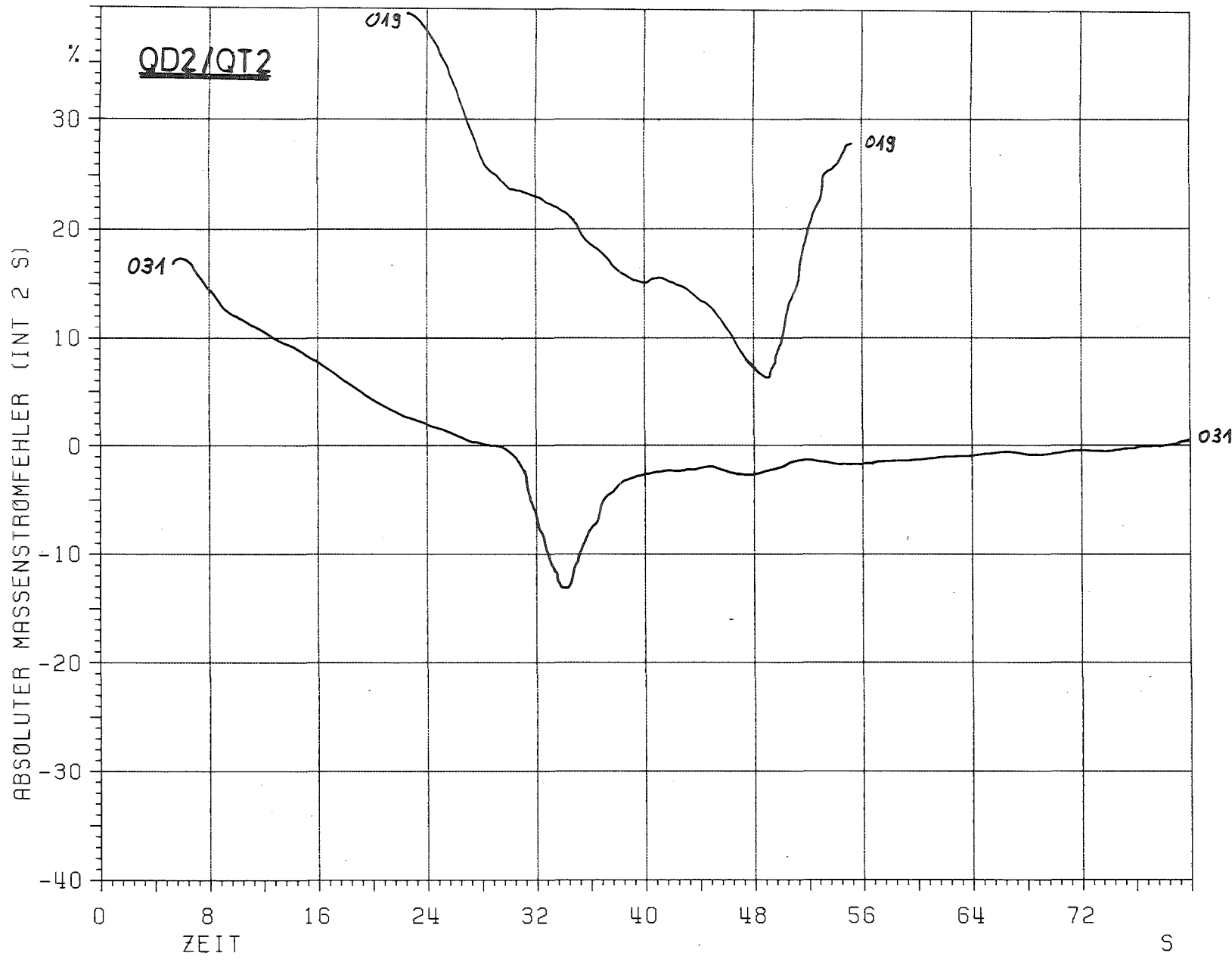
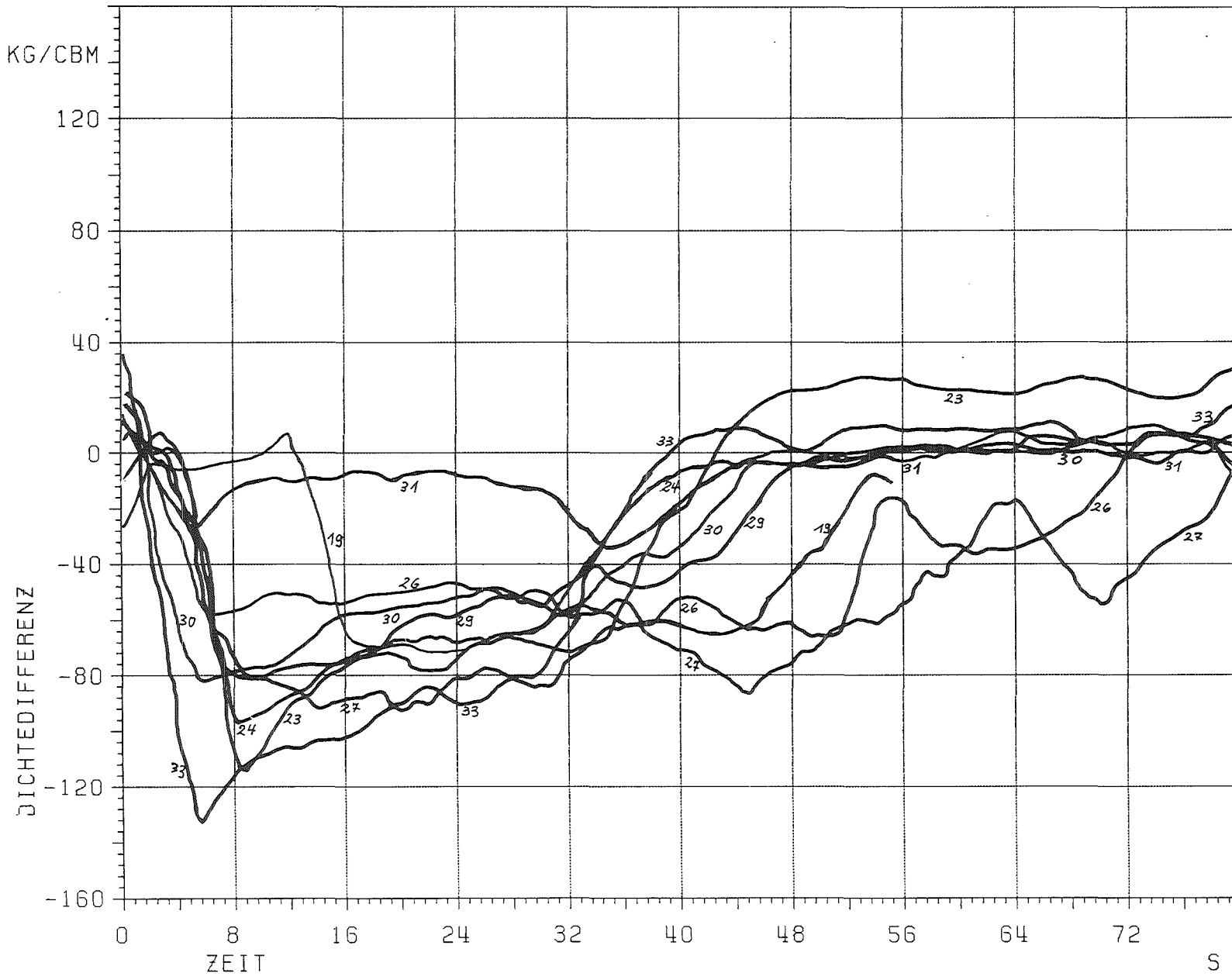


ABB.: 43 ABS. MASSENSTRÖMFEHLER (BEZ. AUF 50 KG/S)



KANAL SYMBOL

- BLW019
- 023
- 024
- 026
- 027
- 029
- 030
- 031
- 033

ABB.: 44 DIFFERENZ (ISPRA 2-STR.-DICHTE) - (IRB 5-STR.-DICHTE) (INT2S)

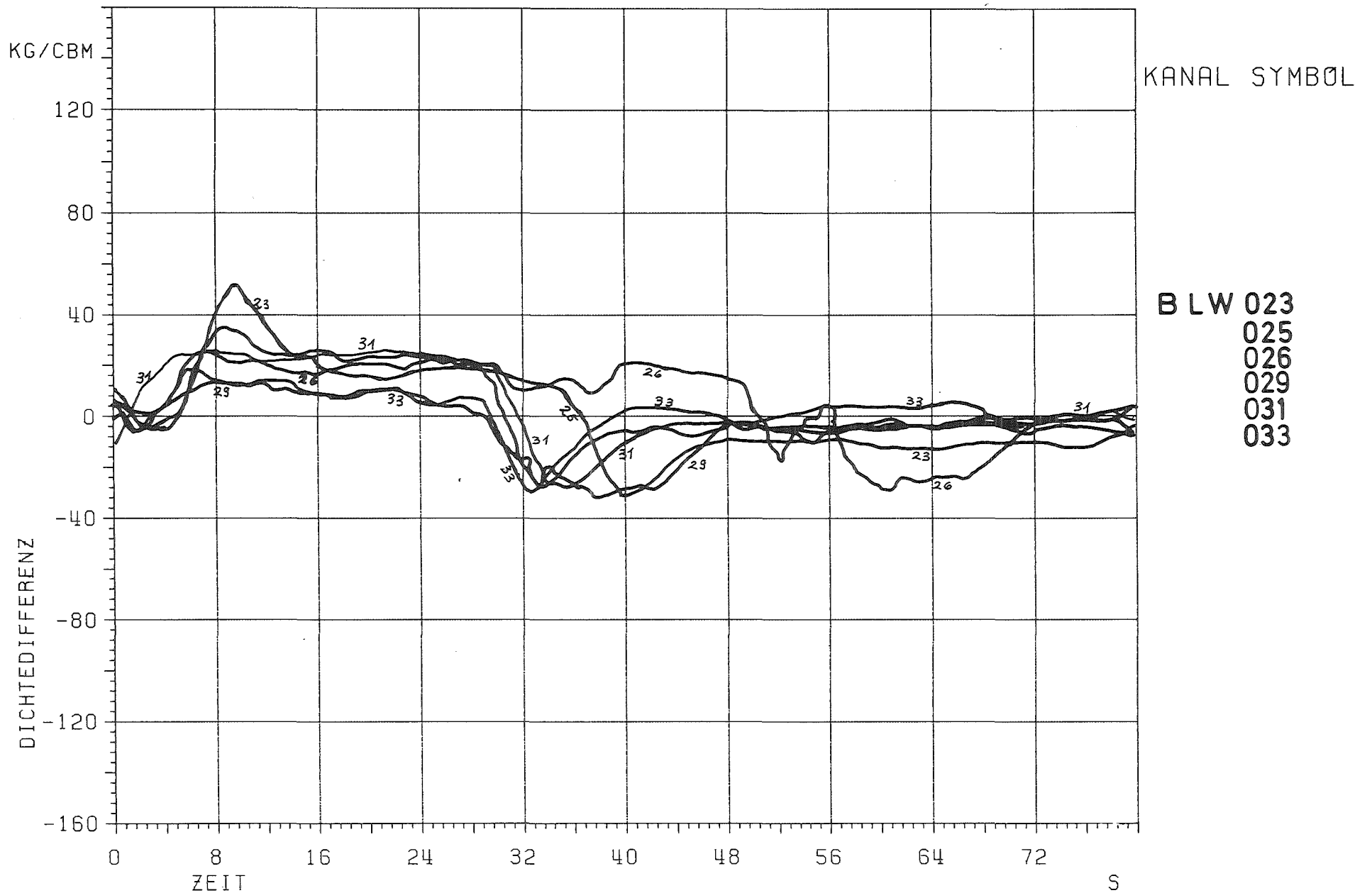


ABB.: 45 DIFFERENZ (LIT 6-STR.-DICHTE) - (IRB 5-STR.-DICHTE) (INT2S)

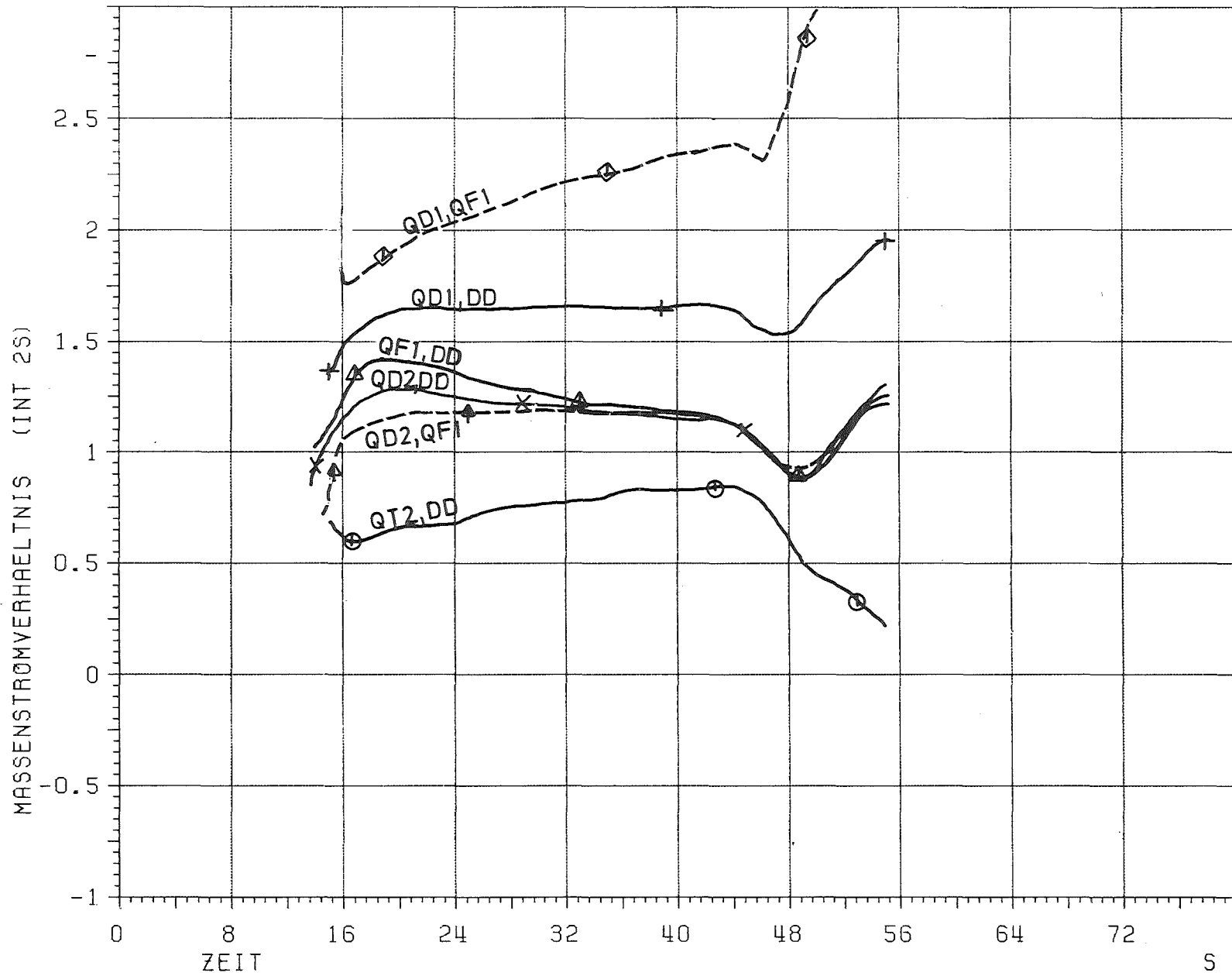


ABB. : 46

MASSENSTROMVERHAELTNIS ZU TMFM

BLW 019

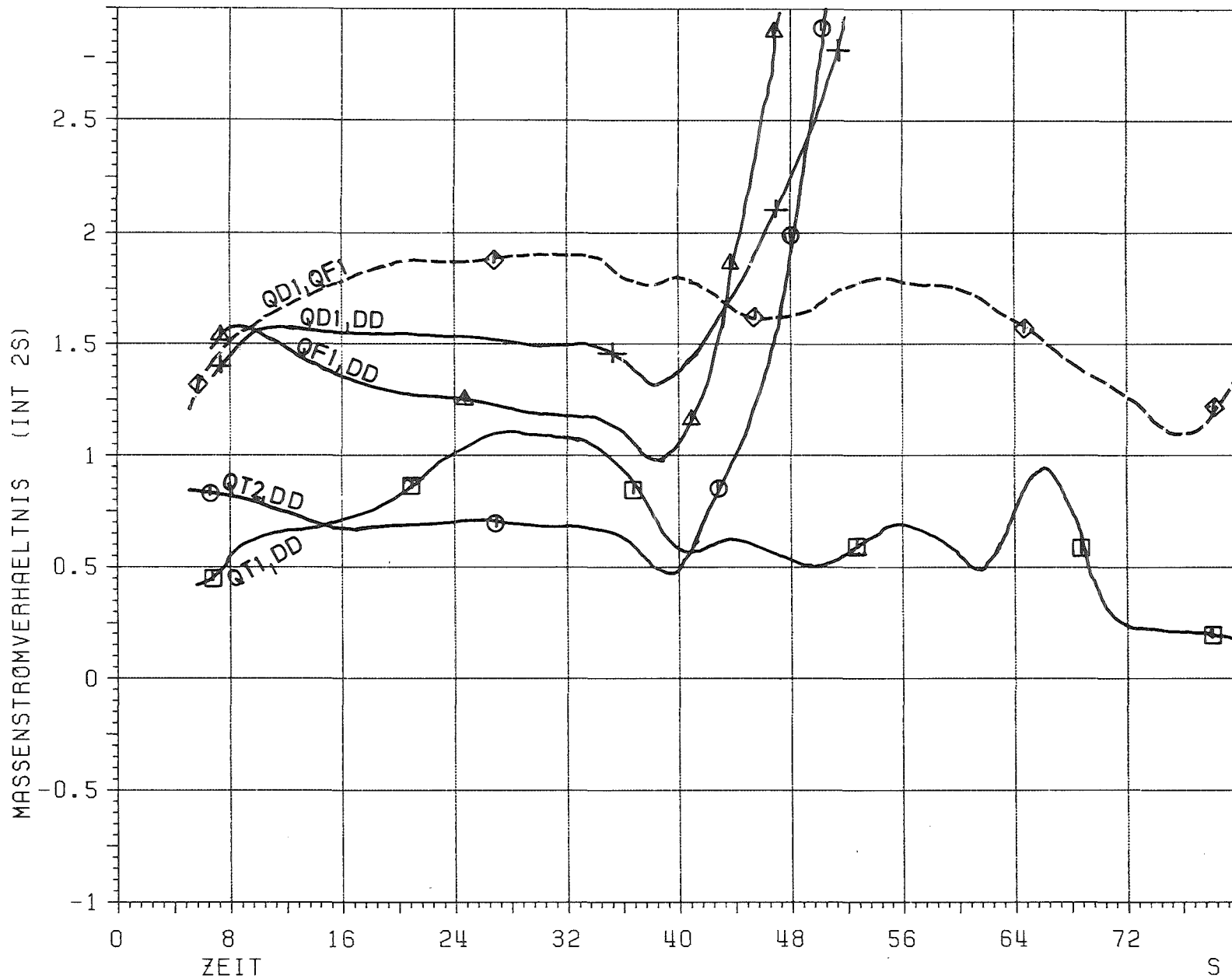


ABB.: 47 MASSENSTROMVERHAELTNIS ZU TMFM

BLW 023

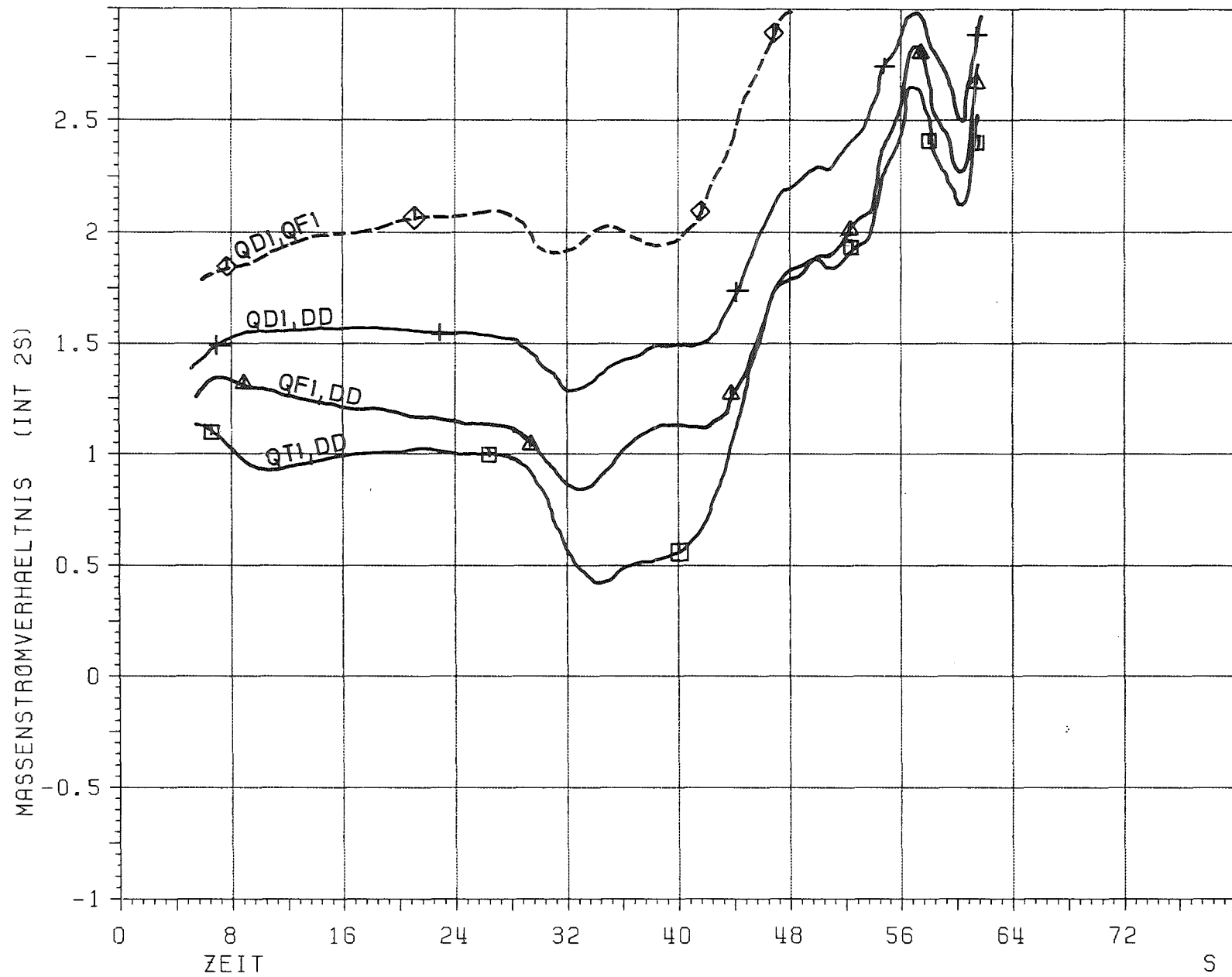


ABB. : 48

MASSENSTROMVERHAELTNIS ZU TMFM

BLW 024

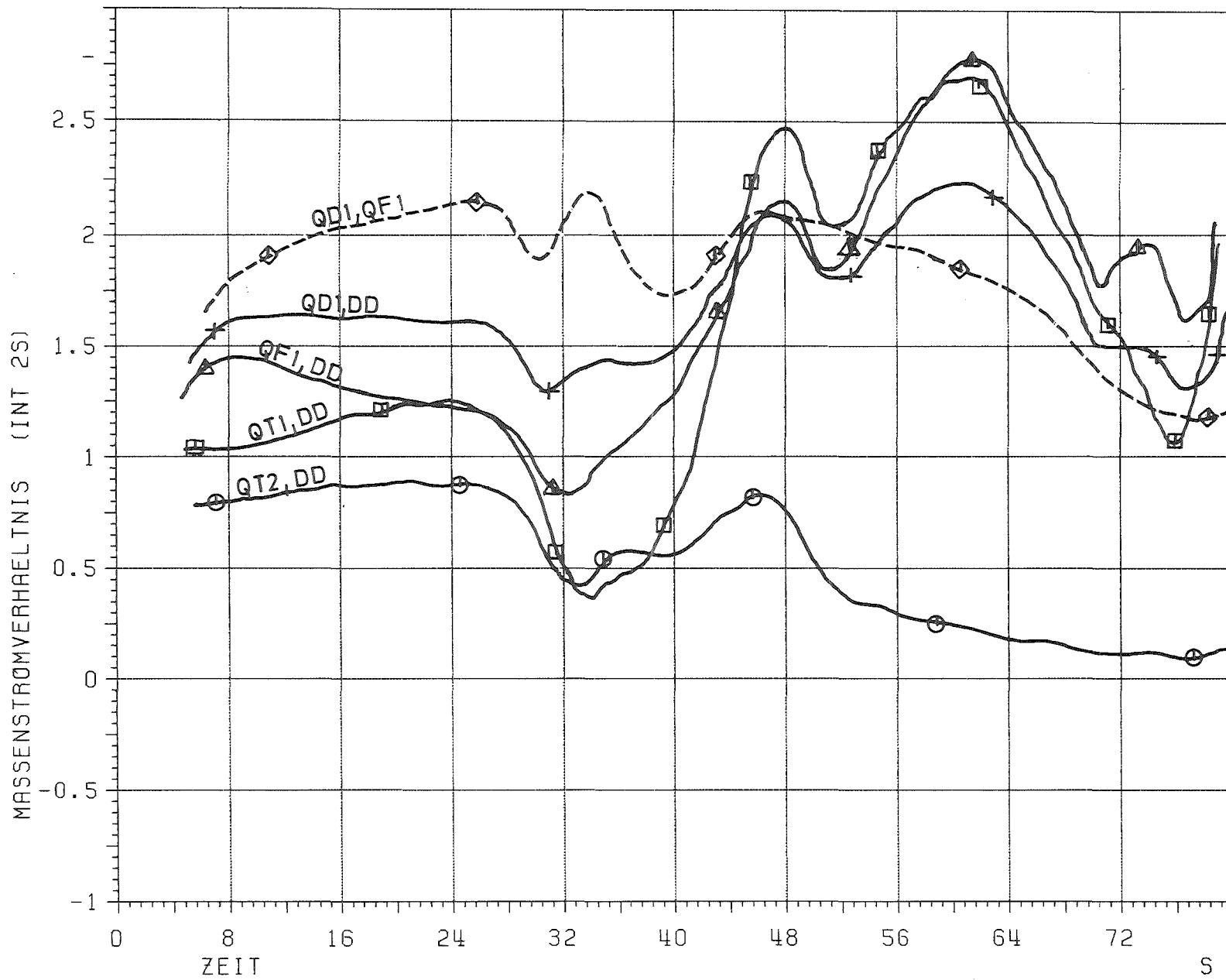


ABB.: 49

MASSENSTRÖMVERHÄLTNIS ZU TMFM

BLW 025

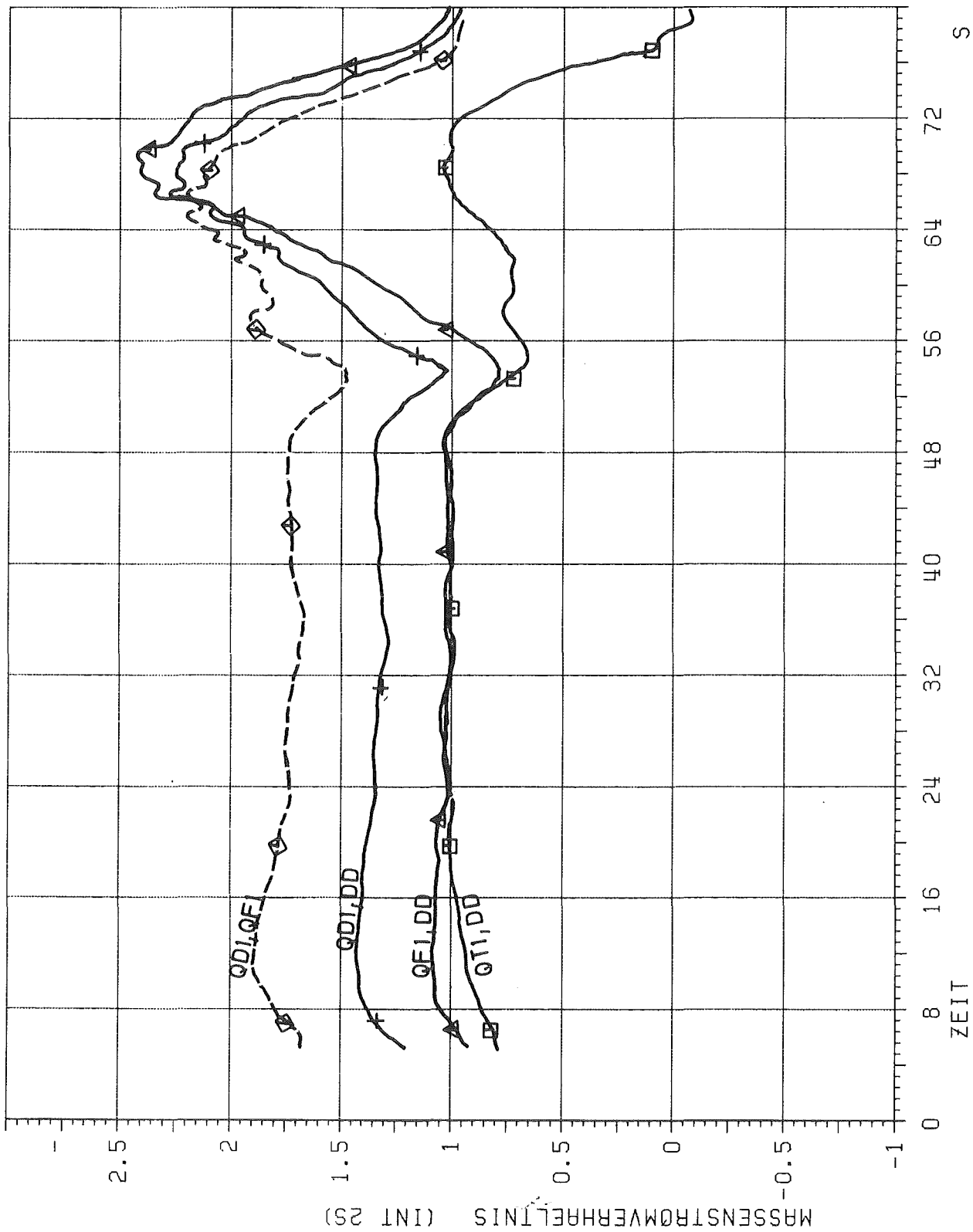


ABB.: 50 MASSENSTRÖMVERHÄLTNIS ZU TMFM **BLW 026**

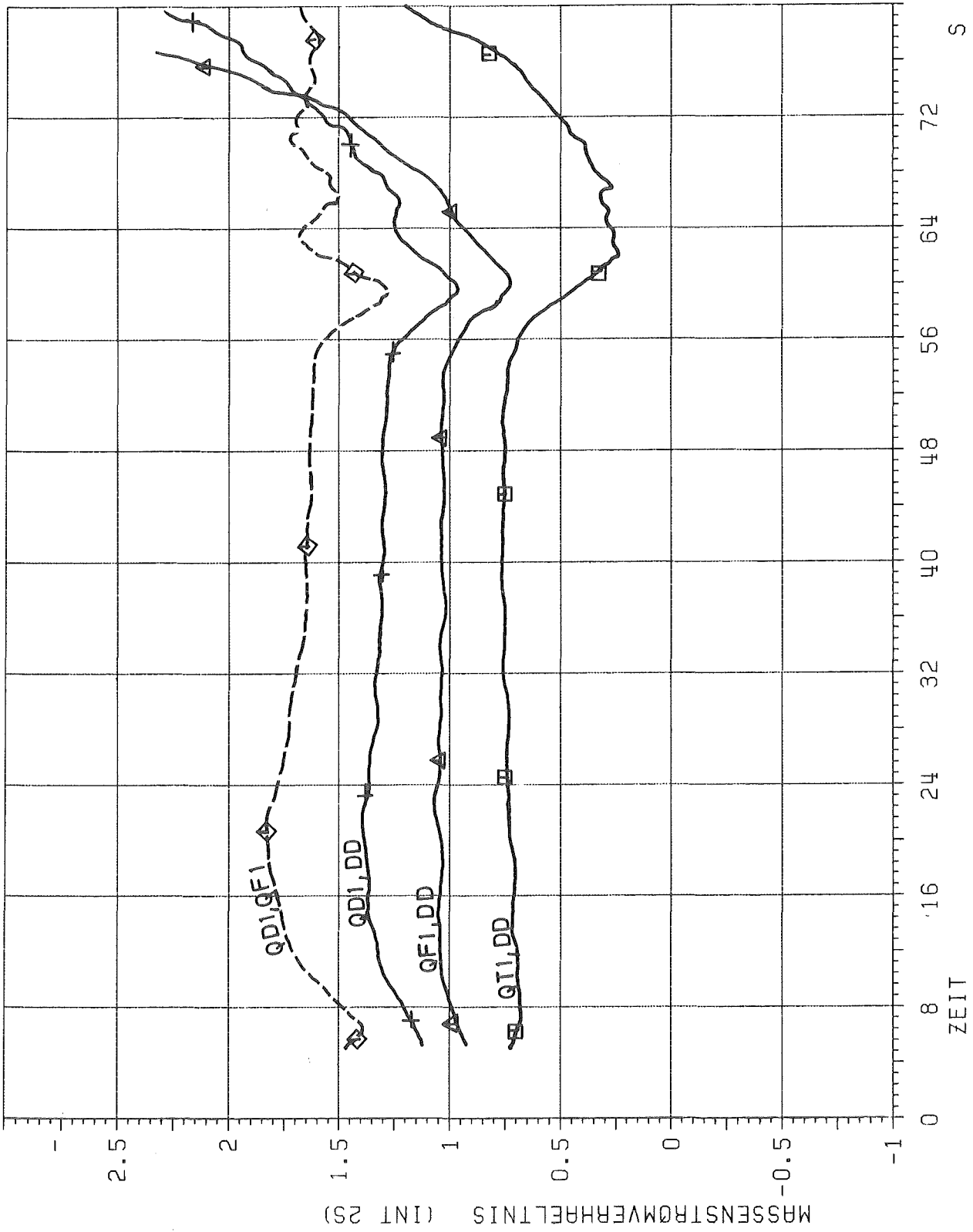


ABB.: 51 MASSENSTROMVERHÄLTNIS ZU TMFM **BLW 027**

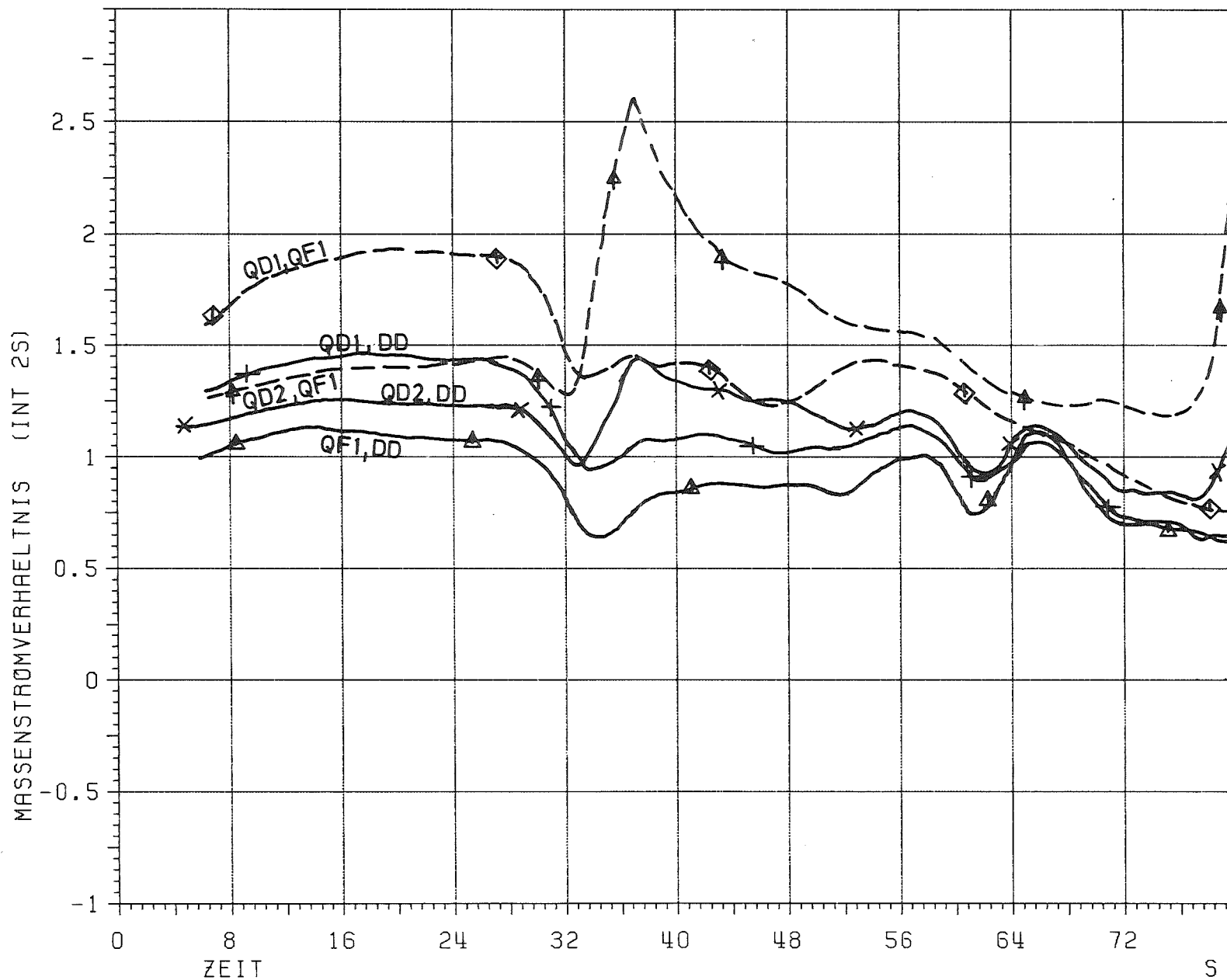


ABB.: 52

MASSENSTROMVERHAELTNIS ZU TMFM

BLW 029

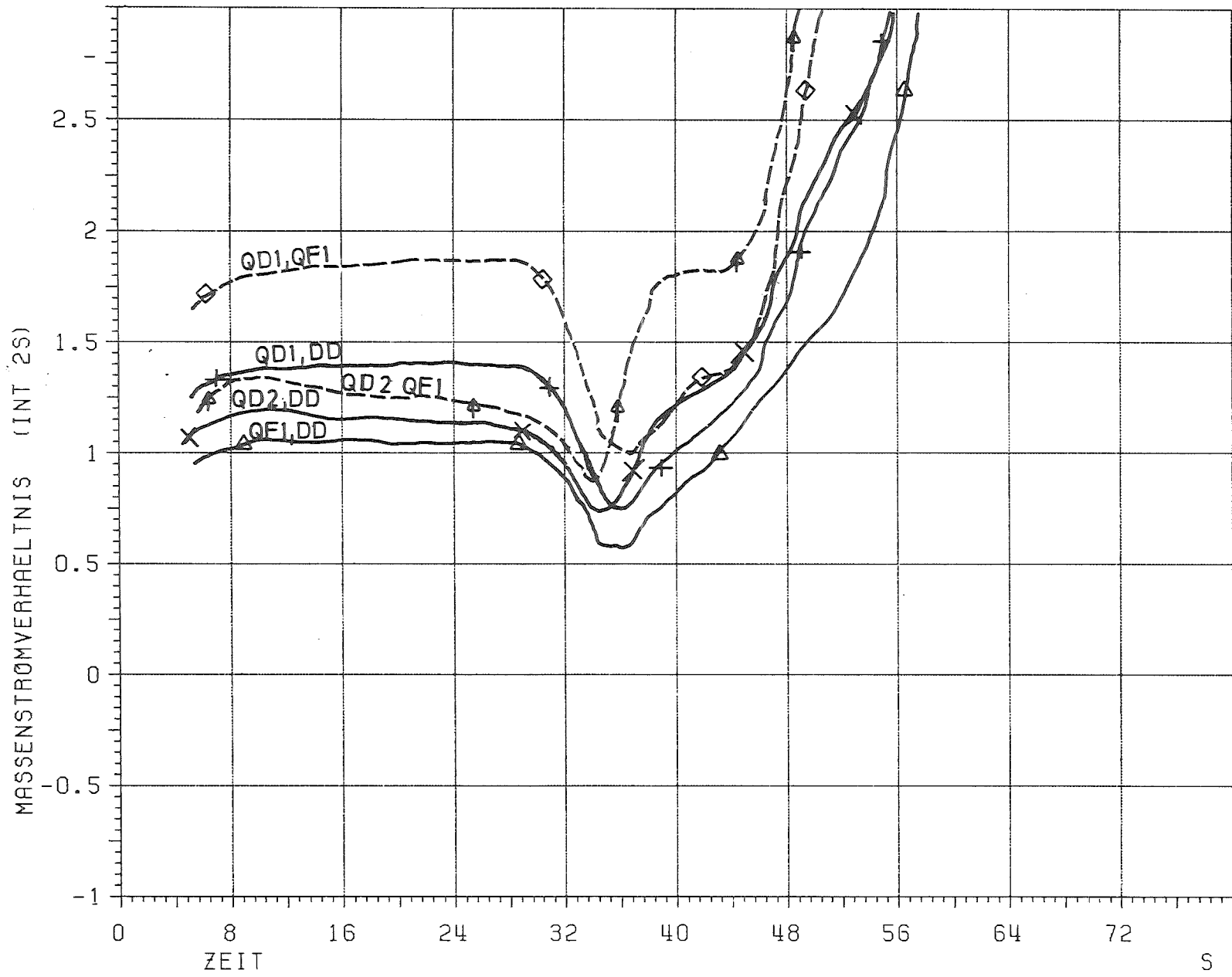


ABB. : 53 MASSENSTROMVERHAELTNIS ZU TMFM

BLW 030

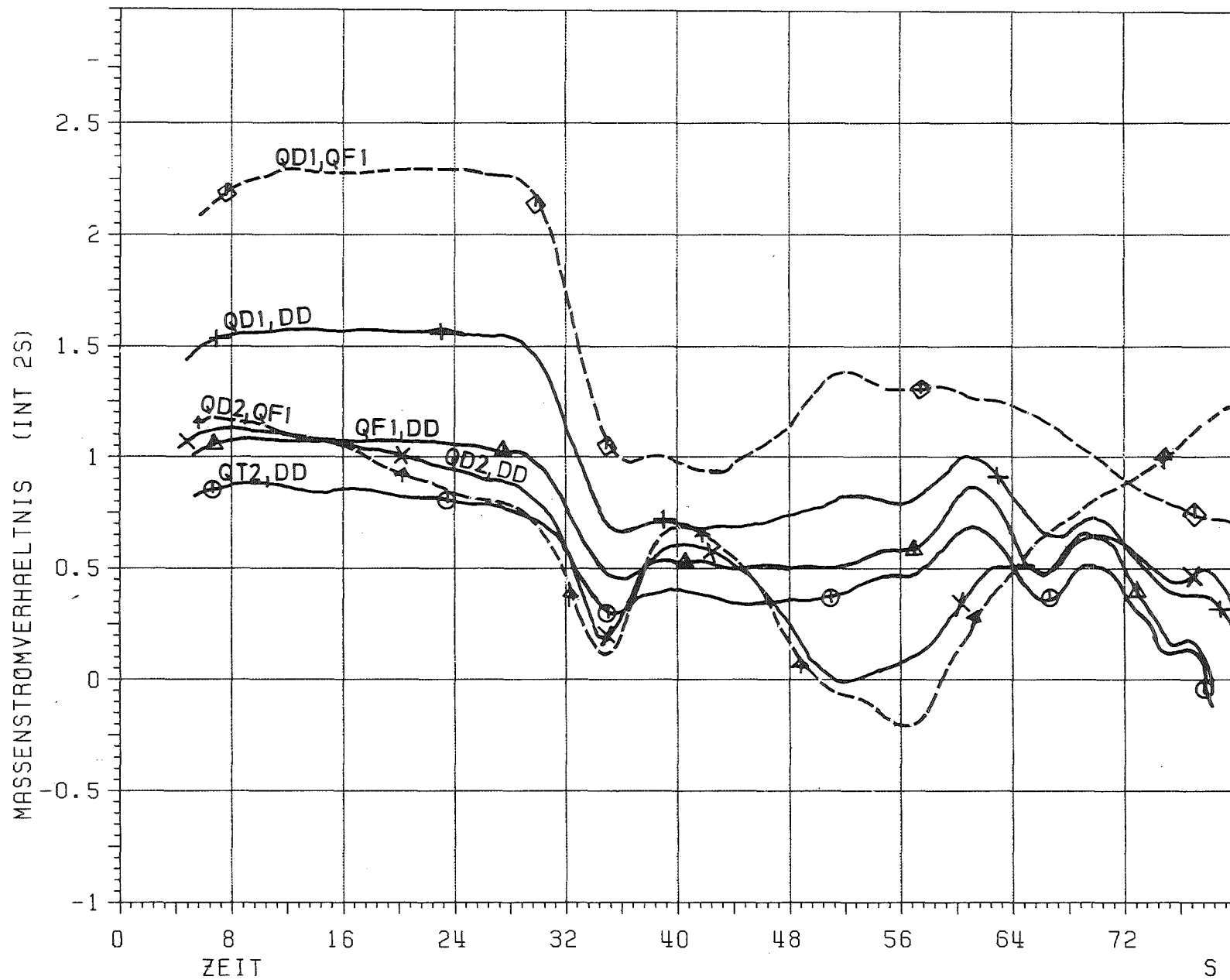


ABB.: 54 MASSENSTRÖMVERHÄLTNIS ZU TMFM

BLW 031

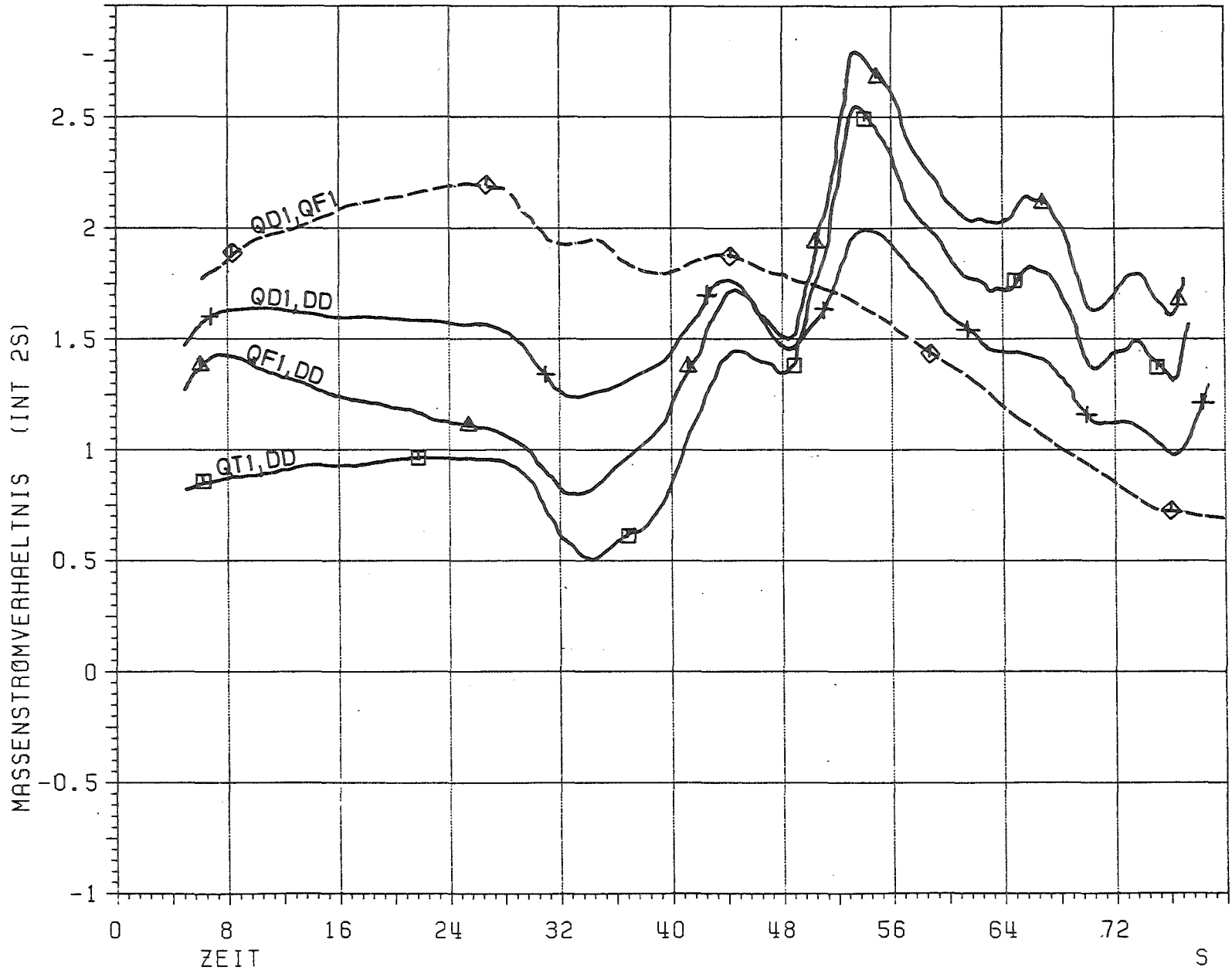


ABB.: 55

MASSENSTRÖMVERHÄLTNIS ZU TMFM

BLW 033